

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Факультет автоматизації промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-21 **Панченко Олександр Вікторович** _____
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проекту:

Доктор філософії, доцент, Швачко Д. Г. _____
(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ:	д.т.н., проф. Щербина В.Ю.	_____
ТЕХ. МАШ.:	ст. викл. Борщик С.О.	_____
ОХОРОНИ ПРАЦІ:	ст. викл. Ковтун А.І.	_____

РЕЦЕНЗЕНТ _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ 2026 рік

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет автоматизації промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр Сокольський

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Панченку Олександрові Вікторовичу

Тема проекту «Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина», керівник проекту Швачко Денис Григорович доктор філософії, доцент, затверджені наказом по університету від «19» травня 2026 р. № 1817-С

1. Термін подання студентом проекту 10.06.2025 р.

2. Вихідні дані до проекту:

Трубний млин, кількість камер – 2 шт., внутрішній діаметр барабана – 1500 мм, довжина барабана – 5886 мм, довжина барабана 5400 мм.

3. Зміст пояснювальної записки

Пояснювальна записка містить текстові частини: «Пояснювальна записка», «Розрахунки та Технологія машинобудування». ПЗ включає такі розділи: «Зміст», «Вступ», «Призначення й галузь застосування виробу, що проєктується», «Технічна характеристика базової машини», «Опис конструкції, її основних частин і принципу дії», «Літературний та патентний огляд стану питання, обґрунтування модернізованої (розроблюваної) конструкції», «Очікувані механіко-економічні показники», «Висновки», «Перелік посилань»

4. Перелік графічного матеріалу

Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина – формат А1, головний вид трубного млину – формат А1, плакат деталювання – формат А1 (вал – формат А3, цапфа – формат А3, барабан – формат А2), плакат з 3D-моделюванням – формат А1, плакат розрахункових даних в Ansis – формат А1, плакат числового моделювання перегородки – формат А1.

5. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
МОДЕРНІЗАЦІЇ	проф. Щербина В.Ю.		
ТЕХ. МАШИНОБУД.	ст. викл. Борщик С.О.		
ОХОРОНА ПРАЦІ	ст. викл. Ковтун А.І.		

6. Дата видачі завдання 18.05.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Вступна частина	18.05-21.05	
2.	Галузь застосування та загальний вигляд	23.05-25.05	
3.	Літературно-патентний огляд	27.05-28.05	
4.	Розрахунки	29.05-30.05	
5.	Моделювання в SolidWorks робочих органів	31.05-01.06	
6.	Розрахунки модернізованої робочих органів у системі Ansys	02.06-03.06	
7.	Охорона праці, технологія машинобудування	04.06-06.06	
8.	Загальні висновки	07.06-15.06	

Студент

Панченко О. В.

Керівник проекту

Швачко Д. Г.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект на здобуття ступеня бакалавра на тему: «Лінія виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина». Виконавець: студент групи ЛП-21 Панченко О. В. Керівник проекту: доктор філософії, доцент, Швачко Д. Г.

Розроблено та виконано бакалаврський дипломний проект на тему «Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина». Основна мета проекту — модернізація міжкамерної перегородки трубного млина.

Дипломний проект включає пояснювальну записку, розрахунки, технологію машинобудування та графічну частину. Загальний обсяг проекту становить 106 сторінок та 17 джерел.

Графічну частину та 3D-моделювання проекту виконано за допомогою програмного забезпечення, «AutoCAD» та «SolidWorks», розрахунки було виконано за допомогою програмного забезпечення «Ansys».

Під час розробки та проектування модернізованої міжкамерної перегородки, спираючись на аналітичний огляд науково-технічної літератури, нормативної та конструкторської документації, патентних досліджень та інженерно-технічних розрахунків, було виконано наступні ключові етапи: вивчено принципи роботи й конструкцію промислових трубних млинів, а також проаналізовано їхні технічні параметри та характеристики. Далі, було проведено серію інженерних розрахунків, необхідних для проектування та розробки елементів млина відповідно до технічного завдання. На основі проведених патентних досліджень здійснено модернізацію міжкамерної перегородки шляхом виконання її робочої поверхні ступінчастою з каскадним розташуванням перфорованих щілин, і в результаті було розроблено та спроектовано модернізований трубний млин.

Ключові слова: ТРУБНИЙ МЛИН, МІЖКАМЕРНА ПЕРЕГОРОДКА, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ПОДРІБНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, СТУПІНЧАСТА ПОВЕРХНЯ.

Abstract

A bachelor's thesis project has been developed and completed on the topic 'Cement production with the modernisation of a tube mill'. The main objective of the project is to modernise the inter-chamber partition of the tube mill.

The thesis comprises an explanatory note, calculations, mechanical engineering methodology and a graphical section. The total length of the project is 106 pages, containing and 17 figures.

During the development and design of the modernised inter-chamber partition, based on an analytical review of scientific and technical literature, regulatory and design documentation, patent research and engineering calculations, the following key stages were carried out: the operating principles and design of industrial tube mills were studied, and their technical parameters and characteristics were analysed. Subsequently, a series of engineering calculations necessary for the design and development of the mill components in accordance with the technical specifications was carried out. Based on the patent research carried out, the inter-chamber partition was modernised by designing its working surface as stepped with a cascading arrangement of perforated slots, and as a result, a modernised tube mill was developed and designed.

Keywords: PIPE MILL, INTER-CHAMBER PARTITION, MODERNISATION, MATERIAL GRINDING, STEPPED SURFACE.

Перелік позначень

- D — внутрішній діаметр барабана млина, м;
- d_k — розрахунковий (середній) діаметр молольних тіл (куль), мм;
- $d_{\max}$ — максимальний діаметр молольних тіл, мм;
- E — модуль пружності (Юнга) матеріалу, МПа;
- F — площа поперечного перерізу (або площа поверхні), m^2 ;
- G_m (або m_m) — маса завантаження молольних тіл, т;
- g — прискорення вільного падіння, m/s^2 ;
- K, k — поправочні коефіцієнти (розмелюваності, форми тіл, ефективності тощо);
- L — робоча довжина барабана млина, м;
- $M_{кр}$ — крутний момент на валу привода, $N \cdot m$;
- m — маса елементів конструкції (барабана, футеровки), кг;
- N — споживана потужність на валу млина, кВт;
- $N_{дв}$ — номінальна (встановлена) потужність електродвигуна, кВт;
- n — робоча частота обертання барабана млина, $хв^{-1}$ (об/хв);
- $n_{кр}$ — критична частота обертання барабана, $хв^{-1}$ (об/хв);
- Q — продуктивність млина, т/год;
- q — питомі витрати електроенергії на подрібнення, кВт·год/т;
- R — внутрішній радіус барабана млина, м;
- R_z — параметр шорсткості поверхні, мкм;
- V — корисний (внутрішній) об'єм барабана млина, m^3 ;
- v — лінійна (колова) швидкість обертання, м/с.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1.Опис технологічної лінії з виробництва портланд цементу з модернізацією трубного млина.....	6
2.Технічні характеристики	9
3.Опис конструкції та принципу роботи трубного млину	10
4. Літературно патентний огляд.....	14
5.Параметричні розрахунки	28
5.1 Параметричні розрахунки млину	28
5.2 Розрахунок приводу.....	50
6.Числові розрахунки.....	55
6.1 Побудова базової моделі «барабан».....	55
6.2 Числове моделювання базової конструкції.....	58
6.3 Результати числових розрахунків базової моделі.....	61
6.4 Числове моделювання модернізованої конструкції.....	63
6.5 Результати числових розрахунків модернізованої моделі	66
7. Охорона праці і навколишнього середовища	68
7.1 Правові основи та організаційно-технічні характеристики об'єкта дослідження	68
7.2Санітарно-гігієнічний аналіз запиленості та мікроклімату.....	70
7.3 Виробнича акустика та захист від вібрації	71
7.4 Електробезпека на ділянці помелу	72
7.5 Пожежна та вибухова безпека.....	72
7.6 Проектування виробничого освітлення.....	73
7.7 Охорона навколишнього середовища.....	74
8 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	76
8.1 Вибір пристосування для вертикально-свердлильної операції	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	83
ДОДАТКИ	86

					ЛП11.167255.001-70						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина	Лім.		Арк.	Акрушів		
Розробив		Панченко О.В.						1	106		
Перевірів		Швачко Д. Г.									
Затвердив		Сокольський							КПІ ім. Ігоря Сікорського		

ВСТУП

Сучасна промисловість будівельних матеріалів, гірничодобувна, хімічна та металургійна галузі тісно пов'язані з удосконаленням процесів подрібнення сировини, яке є одним із найбільш енерговитратних етапів виробництва (до 60–70% витрат електроенергії) і суттєво впливає на властивості матеріалу та якість готової продукції. Особливо важливим тонкий помел є у цементній промисловості, а також у виробництві кераміки, добрив та порошкових матеріалів.

Найпоширенішими машинами для подрібнення є трубні млини, серед яких найбільш перспективним видом є трубний млин, де робочий простір поділено на кілька камер для забезпечення поетапного помелу від грубого до тонкого. Головними проблемами при експлуатації такого обладнання є низька енергоефективність, швидке забивання щілин розвантажувальних пристроїв та недостатня швидкість евакуації готового продукту, що призводить до «перемелу» матеріалу та перевитрати енергії. У цьому контексті модернізація внутрішніх вузлів млина є критично важливим кроком для інтенсифікації виробництва.

Метою дипломного проєкту є модернізація конструкції, принципу роботи та характеристик трубного млина, виконання розрахунку його основних параметрів, а також розробка ефективного варіанта модернізації його розвантажувальної решітки. Для досягнення цієї мети, спираючись на патентні дослідження (зокрема патент UA 90518 U), передбачається впровадження решітки зі ступінчастою робочою поверхнею та каскадним розташуванням перфорованих щілин. Це рішення забезпечує ефект самоочищення та продавлювання застряглих часток під час їх переміщення між ступенями. В межах проєкту заплановано виконання параметричних розрахунків, створення точної 3D-моделі вузла в SolidWorks та проведення чисельного аналізу його напружено-деформованого стану за допомогою програмного комплексу Ansys.

1. Опис технологічної лінії з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина

Технологічна лінія виробництва цементу, яка використовується на більшості великих підприємствах приведена на рисунок. 1.1

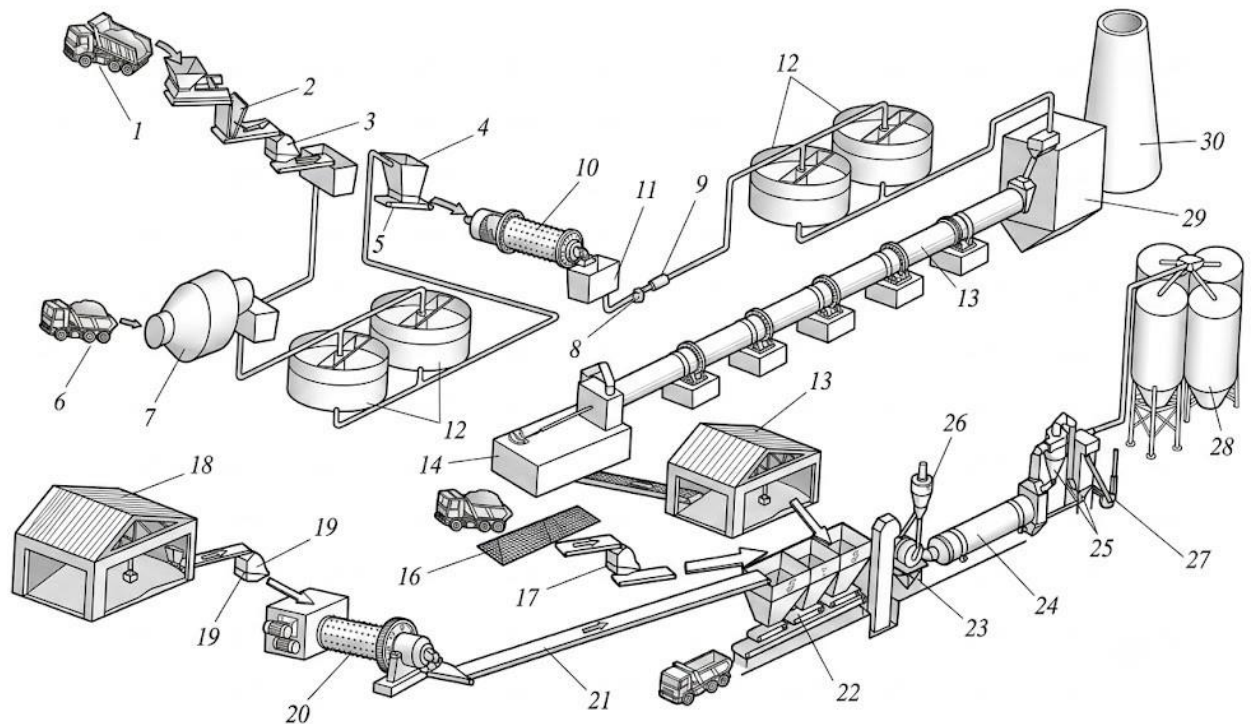


Рисунок 1.1 – Технологічна лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина

Клінкерні матеріали отримують із власних кар'єрів підприємства, звідки їх транспортують на склад сировинного цеху. Склад обладнаний грейферними кранами, приймальними бункерами та силосами для формування резервних запасів. Туди ж додають залізовмісні компоненти (Fe_2O_3). Потім клінкерна сировина надходить у млин «Гідрофол» (поз. 7), де вона подрібнюється й одночасно розмочується. Далі матеріал направляють у глиномішалку з подачею води для формування клінкерного шламу.

Звідти насосом шлам перекачується трубопроводом назад у млин «Гідрофол» (також із додаванням води), де отримують шлам із вологістю близько 40%. Потім насос відкачує шлам, він проходить через сито й потрапляє в трубний млин (поз. 10) для стирання. Після трубного млина клінкерний шлам (вологість

40%) надходить у вертикальні басейни висотою 20 м. Там склад коригують порційно — додаючи шлами з різним вмістом компонентів. Також застосовується поточне коригування: готують два шлами з різним складом і коефіцієнтом насичення, потім змішують їх у горизонтальних шламбасейнах більшої місткості (поз. 12) у потрібній пропорції. Готовий клінкерний шлам інтенсивно перемішується стисненим повітрям.

Із вертикальних басейнів матеріал насосом перекачується в горизонтальні. Після перевірки відповідності складу заданим показникам клінкерний шлам подається на живильник обертової печі (поз. 21). Для стабільної роботи печей важливо, щоб суміш на випал мала оптимальний і постійний склад — від цього залежать продуктивність, витрати тепла, стійкість футеровки та якість кінцевого продукту.

У піч подають природний газ (CH_4). На виході утворюються гранули клінкеру, які надходять у колосниковий холодильник (поз. 14), де охолоджуються з $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далі ковшовим транспортером клінкер потрапляє на відкритий склад (проміжний запас для безперебійності роботи); вилежування на складі підвищує якість цементу. Туди ж подають гіпсовий камінь і доменний шлак. Шлак прибуває залізницею, потім автотранспортом (поз. 1) доставляється в цех підсушування (поз. 22). Вологу з нього видаляють у сушильному барабані (поз. 20), а відпрацьовані гази очищуються електрофільтром (поз. 29) і димососом (поз. 8) перед викидом в атмосферу. Потім клінкер вивантажують у бункер цементного млина (поз. 28), звідки тарілчастими живильниками він подається в млин для помелу (поз. 24).

Після помелу пневмонасосом цемент транспортується трубопроводом у повітряно-прохідний сепаратор, де готовий продукт відокремлюється й направляється на склади (цегляні або металеві), а великі крупи повертаються в млин на домол. Переваги мокрого способу для роботи з клінкером: спрощується подрібнення, легше досягти однорідності суміші, зручніше транспортувати шлам, кращі санітарно-гігієнічні умови. Це пояснює домінування мокрого способу у

вітчизняній промисловості (85% випуску клінкеру). Недоліки: високий вміст води в клінкерному шламі (30–50%) різко підвищує витрати тепла на випаровування на 30–40% більше, ніж при сухому способі. Через це зростають габарити й металосмість печей, адже значна частина печі працює як випарник води.

2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА КОНСТРУКЦІЇ БАЗОВОГО ТРУБНОГО МЛИНА

Кількість камер (робочих зон)	2 шт.
Внутрішні розміри барабана млина:	
внутрішній діаметр	1500 мм
корисна робоча довжина	5400 мм
Зовнішні розміри барабана:	
зовнішній діаметр	1575 мм
загальна довжина барабана	5886 мм
Робоча частота обертання барабана	24 об/хв
Критична частота обертання барабана	34,6 об/хв
Робоче заповнення барабана мелючими тілами	30 %
Загальна маса мелючих тіл (сталевих куль)	13,9 тонн
Максимальний розмір завантажуваних часток сировини	25 мм
Тонкість помелу (залишок на ситі № 008)	8.. 10 %
Продуктивність млина (по клінкеру/цементу)	5,2 т/год
Потужність головного електродвигуна приводу	160 кВт
Частота обертання ротора головного двигуна	735 об/хв
Напруга силової мережі електроприводів	380 В
Габаритні розміри помольного агрегату в зборі:	
довжина	10000 мм
ширина	2800 мм
висота	3100 мм
Загальна маса млина (без урахування мелючих тіл)	30190кг

3. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН

Процеси подрібнення твердих матеріалів є одними з найбільш енергоємних і відповідальних у технологічних схемах підприємств будівельної, гірничо-металургійної та хімічної промисловості. Від ефективності роботи помольного обладнання значною мірою залежать якість готового продукту, стабільність технологічного процесу та економічні показники виробництва.

Одним із найбільш поширених апаратів для тонкого помелу сипких матеріалів є двокамерний трубний млин, конструкція якого забезпечує поетапне подрібнення матеріалу за рахунок послідовного проходження двох камер з різними умовами помелу. Така схема дозволяє оптимально поєднати ударну та стиральну дію мелильних тіл і досягти заданої тонкості помелу при відносно невеликих енергетичних витратах.

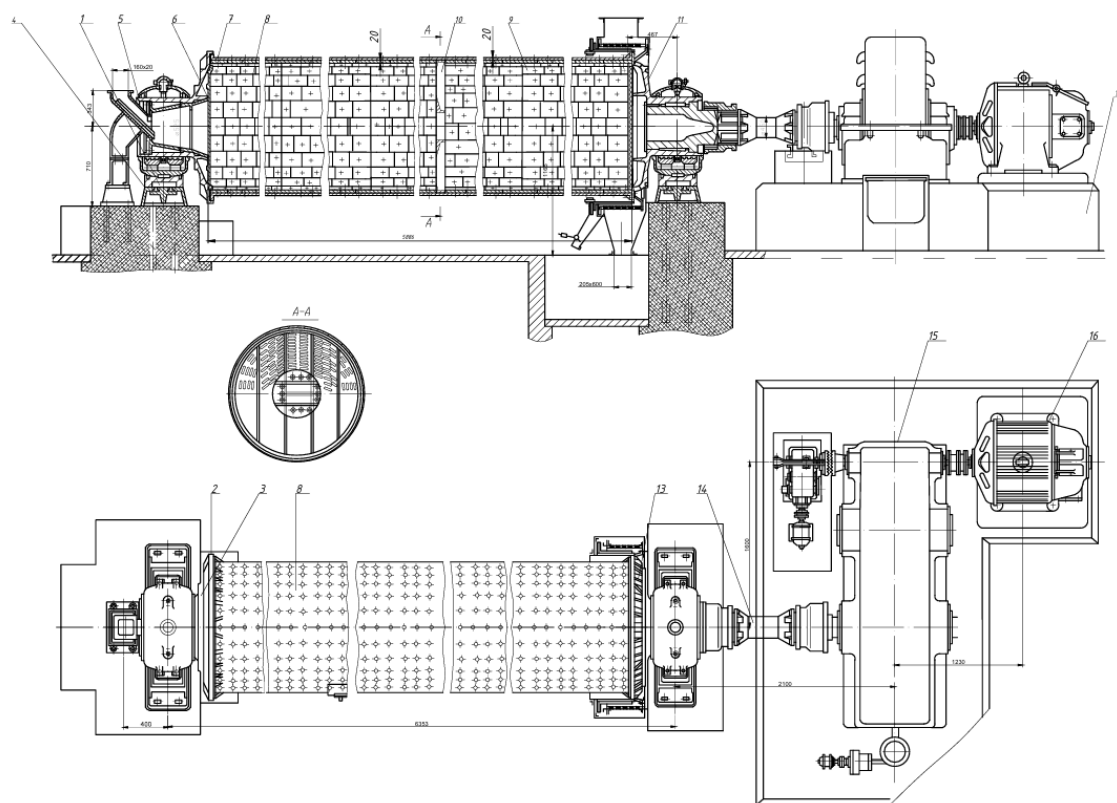


Рисунок 3.1 – Конструктивна схема трубного млина

На даному рисунку наведено конструктивну схему двокамерного млина, виконану у вигляді поздовжнього розрізу, вигляду зверху та перерізу міжкамерної перегородки з цифровими позначеннями основних вузлів і деталей, що дозволяє

детально вивчити будову млина та принцип його роботи.

Двокамерний трубний млин є барабанним подрібнювальним агрегатом безперервної дії. Основним робочим органом млина є барабан (7) у вигляді сталевого циліндра, який встановлений у горизонтальному положенні та обертається навколо своєї осі.

Барабан (7) спирається на опорні підшипникові вузли (2, 3), змонтовані на фундаментній рамі (12). Дані вузли сприймають вагу барабана разом із мелильними тілами та матеріалом, забезпечуючи надійне та повне обертання млина під час роботи.

Подача матеріалу в млин здійснюється через завантажувальну горловину (1) та завантажувальний патрубок (4), розташовані у лівій торцевій частині млина. Вивантаження подрібненого матеріалу після завершення процесу помелу відбувається через розвантажувальну цапфу (13), встановлену у правій частині млина.

З обох боків барабан закритий торцевими кришками (6), які забезпечують герметичність внутрішнього простору млина та служать елементами кріплення завантажувального і розвантажувального вузлів. Внутрішня поверхня барабана футерована футерівочними плитами (8), виготовленими зі зносостійкого матеріалу. Футерівка захищає корпус барабана від абразивного зносу та формує необхідний режим руху мелильних тіл.

У середині барабан поділений на дві камери подрібнення за допомогою міжкамерної перегородки (10). Вона виконує функцію розмежування камер, регулювання потоку матеріалу та запобігає переходу куль великого діаметра в другу камеру.

У першій камері розміщені мелильні кулі великого діаметра, які забезпечують грубий помел матеріалу переважно за рахунок ударної дії.

У другій камері знаходяться кулі меншого діаметра, де відбувається тонкий помел матеріалу шляхом інтенсивного стирання частинок.

Перехід матеріалу з першої камери до другої здійснюється через отвори

міжкамерної перегородки (10), що забезпечує послідовний та контрольований процес подрібнення.

Для технічного обслуговування та контролю стану внутрішніх елементів у корпусі млина передбачені сервісні люки (5, 9). Переріз А-А ілюструє внутрішню будову камер і характер розташування елементів міжкамерної перегородки в барабані.

Обертання барабана забезпечується механічним приводом, який складається з електродвигуна (16), редуктора (15) та проміжного валу (14). Крутний момент від електродвигуна через систему передач передається на розвантажувальну частину, що жорстко закріплена на корпусі барабана, забезпечуючи його обертання з заданою частотою.

Запропонована конструктивна схема двокамерного кульового млина забезпечує ефективний поетапний помел матеріалу, стабільність технологічного процесу, рівномірний гранулометричний склад готового продукту та надійну експлуатацію обладнання в умовах промислового виробництва.

Основні вузли трубного млина:

Барабан (поз. 7) Барабан є основним робочим органом кульового млина. Він являє собою сталевий циліндр, встановлений у горизонтальному положенні та призначений для розміщення мелильних тіл і подрібнюваного матеріалу. Під час обертання барабана створюються умови для ударної та стиральної дії куль на матеріал, що забезпечує процес подрібнення. Барабан сприймає значні механічні навантаження, тому виготовляється зі зварних сталевих елементів підвищеної міцності.

Футерівка (поз. 8) Футерівка призначена для захисту внутрішньої поверхні барабана від абразивного зносу та формування оптимального режиму руху мелильних тіл. Вона виконується у вигляді змінних зносостійких плит і може мати різний профіль (підйомний, хвильовий, гладкий), залежно від камери подрібнення. Футерівка також впливає на інтенсивність помелу та енергоефективність млина.

Грати (міжкамерні та розвантажувальні) (поз. 10, 13) Грати використовуються для розмежування камер подрібнення та регулювання руху матеріалу всередині млина. Міжкамерна перегородка (10) забезпечує контрольований перехід подрібненого матеріалу з першої камери до другої, запобігаючи переміщенню куль великого діаметра. Розвантажувальна цапфа () (із внутрішніми елементами вивантаження) сприяє рівномірному виведенню готового продукту з млина.

Вантажно-розвантажувальний привід: * Завантажувальна горловина (1);

Завантажувальний патрубок (4);

Привід млина (14, 15, 16).

Завантаження матеріалу в млин здійснюється через завантажувальну горловину та патрубок, а вивантаження готового продукту — через розвантажувальний вузол. Привід обертання барабана складається з електродвигуна, редуктора та передавального вала, змонтованих на фундаменті, і забезпечує передачу крутного моменту на барабан.

Опорні підшипникові вузли (поз. 2, 3) Опори служать для встановлення та підтримання барабана в робочому положенні. Вони виконуються у вигляді підшипникових вузлів, змонтованих на фундаментній рамі (12), і сприймають радіальні та осьові навантаження, що виникають під час роботи млина. Надійний опор забезпечує стабільність обертання барабана та довговічність обладнання.

Сервісні та технічні елементи (поз. 5, 9) Сервісні люки призначені для доступу всередину млина під час проведення ремонтних робіт, огляду стану футерівочних плит та міжкамерної перегородки без повного розбирання агрегату. Вони забезпечують зниження часу простою обладнання, покращують умови експлуатації та сприяють стабільній і безпечній роботі млина в умовах промислового підприємства.

4. ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД

4.1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Літературно-патентний огляд з метою вибору модернізації міжкамерної перегородки.

Трубні млини є одними з найбільш енергомістких та затребуваних видів технологічного обладнання, що широко застосовуються в гірничорудній, будівельній, хімічній та інших галузях промисловості для тонкого подрібнення різноманітних матеріалів. Якість готового продукту, питома продуктивність агрегату та його енергоефективність значною мірою залежать від конструкції внутрішньомлинових пристроїв, зокрема міжкамерних перегородок та розвантажувальних решіток. Ці елементи забезпечують своєчасне мелення матеріалу, його транспортування вздовж барабана, а також утримання мелильних тіл у відповідних зонах помолу.

Метою проведення літературно-патентного огляду є аналіз існуючих технічних рішень у галузі конструювання трубних млинів, виявлення їхніх конструктивних недоліків та обґрунтування вибору найбільш ефективного прототипу для подальшого вдосконалення й модернізації.

Об'єктом патентного пошуку міжкамерні перегородки трубних млинів промислового призначення.

Предметом пошуку є конструктивні вдосконалення робочих поверхонь, спрямовані на покращення сепарації та розвантаження матеріалу, підвищення продуктивності млина, усунення забивання отворів, а також оптимізацію напружено-деформованого стану.

За результатами пошуку, було відібрано 10 патентів.

У патенті [1] решітка складається з окремих литих секторів, у яких виконані перфоровані щілини, розширені в бік виходу матеріалу. Робоча поверхня кожного сектора виконана ступінчастою, що дозволяє розташовувати суміжні щілини на різних рівнях по висоті. При збиранні решітки набір секторів утворює каскадну поверхню

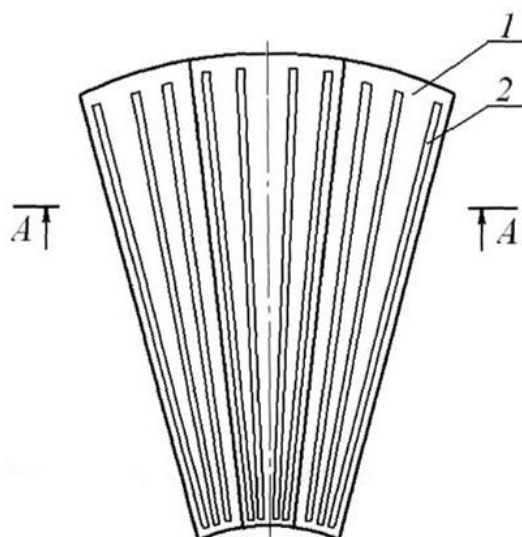


Рисунок 4.1 – Сектор розвантажувальної решітки (за патентом [1])

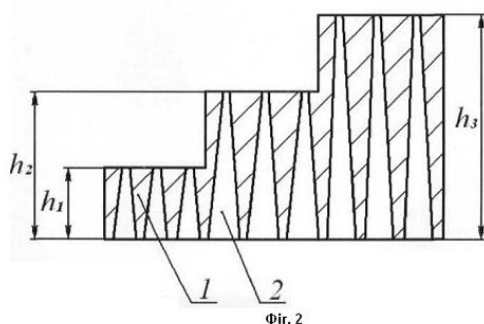


Рисунок 4.2 – Розріз (кут розхилу щілин 10-28°) (за патентом [1])

Принцип дії: При обертанні барабана млина матеріал переміщується по каскадній поверхні решітки. При переході часток з одного ступеня на інший відбувається механічне продавлювання застряглих часток під дією ваги мелючих тіл та нових порцій матеріалу. Розширення щілин у напрямку виходу матеріалу полегшує проходження подрібненого продукту. Кут розхилу щілин становить 10-28°, що

запобігає заклинюванню часток.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в оригінальній каскадній (ступінчастій) формі робочої поверхні секторів, де суміжні щілини розташовані на різних висотних рівнях. Завдяки цьому створюється ефект механічного продавлювання застряглих часток матеріалу при їх переміщенні з одного ступеня на інший, що забезпечує самоочищення решітки.

Порівняно з відомими аналогами (плоскі решітки з постійним перерізом щілин) дане рішення значно підвищує пропускну здатність, усуває ефект «засліплення» решітки, зменшує металомісткість завдяки ребрам жорсткості, утвореним каскадним профілем. Конструкція проста у виготовленні, не потребує додаткових механізмів очищення.

Запропоноване виконання розвантажувальної решітки можна впровадити в міжкамерній перегородці млина для підвищення продуктивності, забезпечення стабільного гранулометричного складу цементу та зменшення позапланових зупинок на очищення.

У патенті [2] Конструкція містить несний каркас та перфоровані плити, де орієнтація та геометрія щілин розраховані на направлений рух матеріалу в наступну камеру без можливості його повернення назад. Решітка працює за принципом одностороннього клапана, що виключає баластне перемелювання вже готового продукту, покращує кінетику сепарації та знижує питомі витрати енергії. Завдяки правильному орієнтуванню сепаруючих отворів решітка вільно пропускає дрібну фракцію далі по ходу технологічного процесу, але затримує великі шматки матеріалу та мелющі тіла.

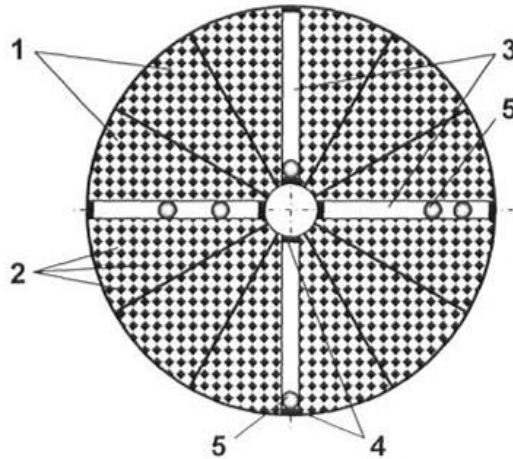


Рисунок 4.3 – Схема міжкамерної решітки з принципом (за патентом [2])

Принцип дії: При обертанні млина матеріал рухається вздовж решітки. Завдяки спеціальній орієнтації щілин дрібна фракція вільно проходить крізь отвори в наступну камеру, тоді як великі частки та мелючі тіла відбиваються та залишаються в першій камері для подальшого подрібнення. Це створює ефект одностороннього клапана.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в оптимізації внутрішньомлинового транспортного процесу шляхом використання перфорованих плит зі спеціальною орієнтацією та геометрією щілин, що забезпечують направлений рух матеріалу.

Порівняно з відомими аналогами (решітки з перпендикулярними отворами) дане рішення зменшує ефект «перемелювання» вже готового продукту, що дозволяє знизити питомі витрати електроенергії та підвищити ефективність помелу. Конструкція потребує точного розрахунку кутів орієнтації щілин.

У патенті [3] Корисна модель описує конструкцію окремої замінної секції (сектора) розвантажувальної решітки. Секція має клиноподібну форму у плані та забезпечена системою поздовжніх або радіальних щілин. У зоні сполучення секції з суміжними елементами та корпусом млина виконані спеціальні посилені

припливи та пази, які оптимізують розподіл зусиль у болтових або безболтових кріпленнях

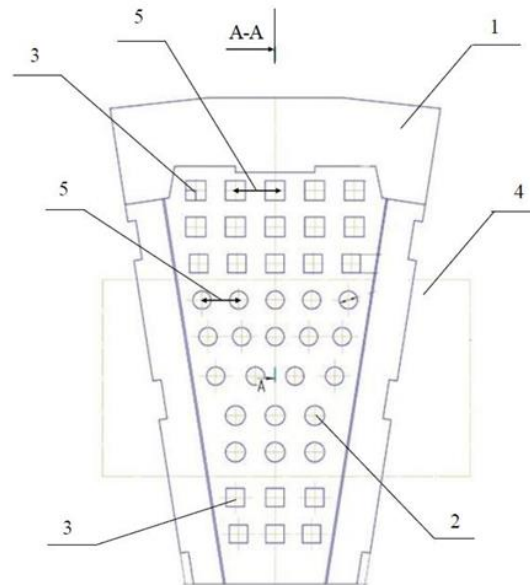


Рисунок 4.4 – Конструкція секції з різною площею отворів (за патентом [3])

Принцип дії: Виконання решітки у вигляді окремих уніфікованих секцій дозволяє замінювати лише ті зони, які зазнали найбільшого абразивного зносу. Посилені зони кріплення запобігають ослабленню фіксації та руйнуванню болтів від вібрації.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в модульній конструкції розвантажувальної решітки, яка складається з окремих уніфікованих секцій з посиленими зонами кріплення.

Порівняно з відомими аналогами (цільнолиті решітки) дане рішення дозволяє проводити заміну лише зношених секцій, а не всієї решітки, що значно знижує експлуатаційні витрати. Посилені зони кріплення забезпечують надійність фіксації при вібраційних навантаженнях.

У патенті [4] Розвантажувальна частина містить безпосередньо решітку, розвантажувальну цапфу та проміжну камеру з елеваторними пристроями (черв'яками або лопатями). Лопаті розташовані за решіткою і призначені для

підйому матеріалу, що пройшов через отвори, та спрямування його у внутрішню порожнину вихідної цапфи млина.

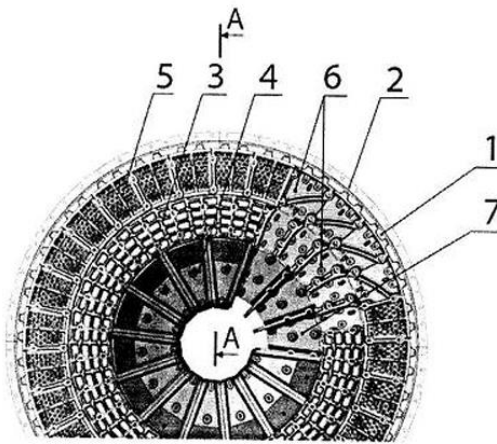


Рисунок 4.5 – Схема розвантажувальної частини (за патентом [4])

Принцип дії: Матеріал, який пройшов крізь решітку, потрапляє на лопаті, які піднімають його та спрямовують у розвантажувальну цапфу. Запропонована конфігурація лопатей забезпечує примусове та швидке виведення подрібненої суміші, запобігаючи її поверненню назад через щілини.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в усуненні ефекту гальмування розвантаження шляхом встановлення елеваторних лопатей спеціальної конфігурації.

Порівняно з відомими аналогами (пасивне розвантаження під дією сили тяжіння) дане рішення забезпечує примусове евакуювання матеріалу з проміжної камери, що підвищує продуктивність агрегату та усуває баластне навантаження.

У патенті [5] Пристрій включає розвантажувальну решітку, що примикає до торцевої кришки барабана, та внутрішні канали змінної геометрії. Канали виконані за спіраллю Архімеда або мають похилі напрямні, які плавно звужуються у напрямку до вихідного отвору млина.

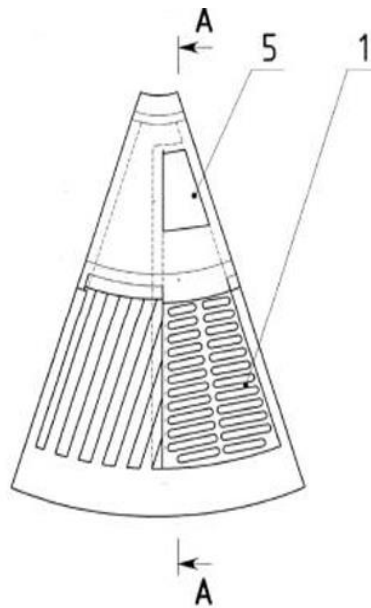


Рисунок 4.6 – Схема каналів (за патентом [5])

Принцип дії: Плавна траєкторія спіральних каналів мінімізує завихрення та утворення застійних зон безпосередньо за несучою решіткою, що знижує механічний опір під час руху двофазного потоку (подрібненого матеріалу з повітрям).

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в оптимізації гідродинаміки потоку матеріалу на виході з млина шляхом використання каналів змінної геометрії за спіраллю Архімеда.

Порівняно з відомими аналогами (прямі канали постійного перерізу) дане рішення суттєво знижує гідродинамічний опір, мінімізує завихрення та застійні зони, що підвищує ефективність розвантаження.

У патенті [6] розвантажувальна решітка барабанного млина складається з окремих литих секторів із перфорованими щілинами, які виконані з розширенням у бік виходу подрібненого матеріалу. Головною конструктивною особливістю є те, що робоча поверхня кожного сектора виконана з чергуванням окремих зон. При цьому суміжні щілини або ряди отворів розташовані на різних висотних

позначках. Набір таких секторів у зборі утворює рельєфну робочу поверхню.

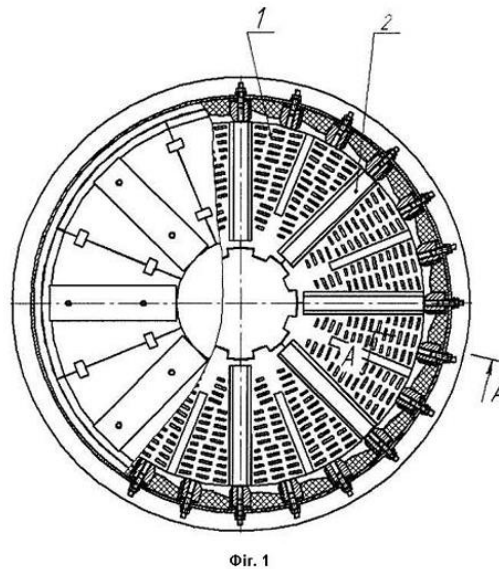


Рисунок 4.7 – Профіль щілини (за патентом [6])

Принцип дії: Завдяки розташуванню суміжних щілин на різних висотних позначках створюється рельєфна поверхня, яка інтенсифікує перемішування матеріалу та полегшує його проходження крізь решітку.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в чергуванні висотних позначок розташування щілин на робочій поверхні секторів, що створює рельєфну поверхню для інтенсифікації процесів перемішування та просіювання.

Порівняно з відомими аналогами (решітки з усіма щілинами на одному рівні) дане рішення покращує розподіл матеріалу по поверхні решітки та зменшує ймовірність локального забивання отворів.

У патенті [7] Дана конструкція решітки передбачає наявність на її робочій поверхні спеціальних захисних виступів або ребер, які розташовані між рядами перфорованих щілин. Ці виступи мають асиметричний профіль з урахуванням напрямку обертання млина.

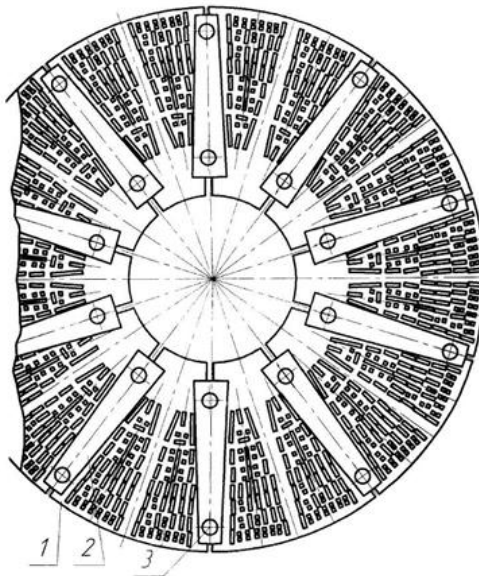


Рисунок 4.8 – Сектор решітки (за патентом [7])

Принцип дії: Захисні виступи виконують подвійну функцію: по-перше, вони захищають ділянки зі щілинами від прямого руйнівного удару падаючих великих мелющих тіл, приймаючи основну кінетичну енергію на себе; по-друге, вони додатково піднімають матеріал та інтенсифікують процес перемішування.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає у використанні захисних виступів асиметричного профілю, розташованих між рядами перфорованих щілин.

Порівняно з відомими аналогами (решітки без захисту щілин) дане рішення значно підвищує ресурс роботи решітки за рахунок захисту отворів від прямих ударів мелющих тіл, а також додатково інтенсифікує подрібнення завдяки збільшенню висоти підйому матеріалу.

У патенті [8] решітка характеризується особливим виконанням перемичок між суміжними щілинами. Перемички мають радіусні заокруглення у місцях переходу в несучу основу сектора, а самі щілини згруповані у блоки, розділені суцільними неперфорованими поясами жорсткості.

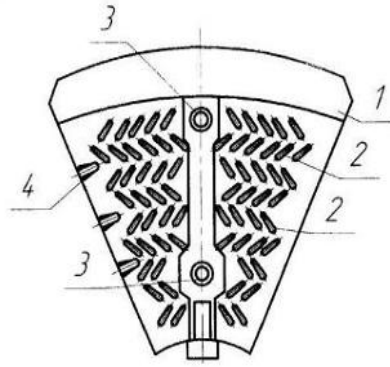


Рисунок 4.9 – Профіль щілини (за патентом [8])

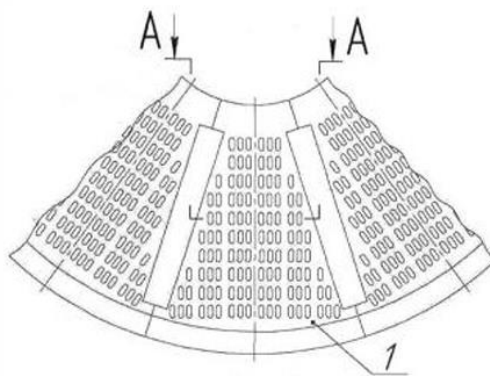
Принцип дії: Введення суцільних неперфорованих поясів створює жорсткий внутрішній силовий каркас плити. Радіусні галтелі замість гострих кутів у кутах щілин знижують концентрацію напружень.

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає в оптимізації напруженого стану деталі шляхом виконання перемичок з радіусними заокругленнями та введенням неперфорованих поясів жорсткості.

Порівняно з відомими аналогами (перемички з гострими кутами) дане рішення суттєво знижує коефіцієнт концентрації напружень, що запобігає появі тріщин при циклічних навантаженнях та підвищує загальну надійність решітки.

У патенті [9] досконалення полягає в тому, що щілини на секторах решітки виконані не вздовж радіусів, а під певним розрахунковим кутом до них (коса перфорація). Кут нахилу щілин плавно змінюється від центру решітки до її

периферії.



Фіг. 1

Рисунок 4.10 – Схема косої перфорації (за патентом [9])

Принцип дії: Така орієнтація отворів враховує реальну колову та відносну швидкість руху часток матеріалу при обертанні барабана. Коса перфорація дозволяє часткам заходити у щілини за найбільш оптимальною траєкторією «ковзання».

Аналіз патенту: Суть корисної моделі полягає у виконанні щілин під змінним розрахунковим кутом до радіуса решітки (коса перфорація), що адаптується до реальної траєкторії руху часток матеріалу.

Порівняно з відомими аналогами (радіальна перфорація) дане рішення збільшує пропускну здатність решітки, знижує гідродинамічний опір та покращує умови самоочищення отворів завдяки оптимальній траєкторії «ковзання» часток.

У патенті [10] Решітка відрізняється конструкцією вузлів спряження окремих секторів між собою. На торцевих гранях секторів виконані пазогребеневі замки із закладеними у них еластичними або ущільнювальними прокладками

4.2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

На основі проведеного патентного пошуку для подальшого вдосконалення трубного млина обрано патент [1] – UA 90518 «Розвантажувальна решітка барабанного млина».

Опис роботи конструкції за патентом [1] Згідно з описом до патенту [1] та кресленнями (рисунок 1 – сектор розвантажувальної решітки, рисунок 2 – розріз А-А, де показано кут розхилу щілин), робочий процес відбувається наступним чином. В процесі обертання барабанного млина його торцеві стінки, зокрема розвантажувальна решітка, сприймають постійний натиск великого об'єму подрібнюваного матеріалу. Знаходячись під дією відцентрової сили, тертя і підйомної сили, подрібнений матеріал піднімається вгору з наступним переміщенням донизу.

Розвантаження камери трубного млина здійснюється шляхом подачі подрібненого матеріалу крізь випускні щілини секторів, що в зборі створюють розвантажувальну решітку. Вибір даного технічного рішення як базового прототипу обумовлений такими ключовими факторами:

1. Висока якість сепарації та захист від заклинювання матеріалу. Виконання перфорованих щілин із розширенням у бік виходу матеріалу та чітко розрахованим кутом розхилу, що становить 10-28°, ефективно запобігає заклинюванню продуктів подрібнення. Коли матеріал під дією відцентрової сили, тертя і підйомної сили переміщується між різними висотними рівнями, відбувається примусове продавлювання застряглих часток у напрямку розвантаження барабанного млина. Це забезпечує стабільне самоочищення розвантажувальної решітки та виключає необхідність її обслуговування через забивання.
2. Стабільність транспортних потоків та відсутність застійних зон. Набір литих секторів у зборі являє собою каскадну поверхню, де суміжні щілини розташовані на різних рівнях. Завдяки такому просторовому чергуванню, у зоні кожного

каскадного перепаду створюється ефект класифікації частинок матеріалу за розмірами. Це запобігає утворенню застійних зон, забезпечує постійне переміщення маси донизу та суттєво збільшує загальну продуктивність млина.

3. Підвищення експлуатаційного ресурсу. Впровадження каскадного профілю робочої поверхні дозволяє досягти оптимального поєднання високої міцності та мінімальної матеріаломісткості. На відміну від плоских решіток, які зазнають значного абразивного і гідроабразивного спрацювання при динамічних навантаженнях, об'ємна каскадна форма краще витримує постійний натиск великого об'єму подрібнюваного матеріалу. Це значно знижує стирання робочих поверхонь секторів і продовжує безперебійний термін служби обладнання. Таким чином, впровадження модернізованої решітки за патентом [1] дозволить стабілізувати гранулометричний склад готового продукту, скоротити кількість позапланових зупинок млина для очищення міжкамерних перегородок та підвищити загальну енергоефективність процесу помелу.

5 ПАРАМЕТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ

5.1 Параметричні розрахунки млину

Основною метою проведення параметричних розрахунків є детальне визначення ключових режимів млина, які забезпечують його ефективне функціонування. У процесі таких розрахунків встановлюються оптимальні параметри, зокрема маса завантаження, продуктивність обладнання, а також необхідний рівень споживаної потужності. Це дозволяє досягти максимальної ефективності процесу подрібнення і забезпечити стабільність роботи млина в заданих експлуатаційних умовах.

Частота обертання барабану:

$$n_{\text{опт}} = \frac{32}{\sqrt{D_0}}$$
$$n_{\text{опт}} = \frac{32}{\sqrt{D_0}} = \frac{32}{\sqrt{1.5}} = 0.435 \text{ об/с} = 26.1 \text{ об/хв}$$

Зовнішній діаметр барабана:

$$D = 1.05 * D_0 = 1.05 * 1.5 = 1.575 \text{ м}$$

Довжина барабана:

$$L = 1.09 * L_0 = 1.09 * 5.4 = 5.886 \text{ м}$$

Діаметр цапфи:

$$D_{\text{ц}} = 0.35 * D_0 = 0.35 * 1.5 = 0.525 \text{ м}$$

Об'єм камери:

$$V = \frac{\pi * D_0^2 * L_0}{4}$$
$$V = \frac{3.14 * 1.5^2 * 5.4}{4} = 9.54 \text{ м}^3$$

Маса мелючих тіл:

$$m_{\text{мел}} = \varphi * \mu * \rho_{\text{мел}} * V$$
$$m_{\text{мел}} = 0.34 * 0.55 * 7.8 * 9.54 = 13.9 \text{ т}$$

Де μ – коефіцієнт порожнистості завантаження, $\mu = 0,5 \dots 0,6$, приймаємо $\mu = 0,55$;

ρ – об’ємна маса мелючих тіл, $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$.

Розрахунок критичної і оптимальної кутової швидкості барабана

Критичною називається така швидкість обертання барабана, за якої кулі зовнішнього шару залишаються притиснутими до його поверхні і не відриваються від стінок. У цьому режимі кулі просто обертаються разом із барабаном, не виконуючи корисної роботи подрібнення, при цьому подрібнення матеріалу, що знаходиться в барабані, повністю припиняється, оскільки відсутній механізм передачі ударної чи стиральної дії молоткових тіл на подрібнювану масу.

Найефективнішим же вважається режим роботи, коли швидкість обертання барабана забезпечує таку траєкторію руху молоткових куль, за якої вони під впливом відцентрованої сили проходять певну частину шляху, притискаючись до внутрішньої облицьованої поверхні млина. Далі, досягнувши певної максимальної висоти, вони в точці А відділяються від поверхні барабана і починають вільно падати під кутом до горизонту, що обумовлено дією гравітаційної сили. Внаслідок цього вільного польоту куль завдають ефективних ударів по матеріалу, що сприяє його подрібненню (рисунк 5.1).

Основна частина роботи молоткових тіл на подрібнення припадає на енергію удару, тоді як внесок від стирання матеріалу становить усього 2-3% від загальної витраченої енергії. Точка А, у якій кулі зовнішнього шару відриваються від поверхні барабана і напрямком дії відцентрованої сили в момент відриву. При цьому формується певний кут α між вертикальною віссю барабана і напрямком дії відцентрової сили в момент відриву. Цей кут отримав назву кута відривання, і він є одним із важливих параметрів для оцінки ефективності процесу подрібнення в млині.


$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{g}{R}}$$

R – радіус обертання кулі;

Відрив кулі від стінок у точці А буде в тому випадку, коли:

$$m g \cos \alpha \geq m \omega^2 R$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{R}}$$

30

$$\begin{cases} x = v t \cos \alpha \\ y = v t \sin \alpha - \frac{g t^2}{2} \end{cases}$$

Рішенням даної системи є ордината точки В

Отримаємо:

$$y_B = x_B \operatorname{tg} \alpha - \frac{x_B^2}{2 R \cos^3 \alpha}$$

Траєкторія руху куль у системі координат $x_0 y_0$ (з початком у центрі окружності) описується рівнянням:

$$x_1^2 + y_1^2 = R$$

Згідно схеми (рис. 5.1):

$$x_1 = x_B - R \sin \alpha;$$

$$y_1 = y_B - R \cos \alpha$$

Підставивши ці значення в попередній вираз, одержимо:

$$x_B + y_B - 2 R x_B \sin \alpha - 2 R y_B \cos \alpha = 0$$

Після всіх математичних перетворень :

$$\frac{x_B^3}{4 R \cos^4 \alpha} * \left(\frac{x_B}{4 R \cos^2 \alpha} - \sin \alpha \right) = 0$$

Корені $x_1 = x_2 = x_3$, що відповідають перетинанню параболи з окружністю в точці А (початок координат), дорівнюють нулю, тоді треба розв'язати рівняння:

$$\frac{x_B}{4 R \cos^2 \alpha} - \sin \alpha = 0$$

Звідки:

$$x_B = 4 R \cos^2 \alpha \sin \alpha$$

Тоді,

$$y_B = -4 R \sin^2 \alpha \cos \alpha$$

Найбільша енергія удару кулі буде при максимальній координаті y_B . Щоб визначити максимальну координату y_B , візьмемо першу похідну її функції

$$y' = 8 R \sin \alpha \cos^2 \alpha - 4 R \sin^3 \alpha = 4 R \sin \alpha (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0$$

α і R не дорівнюють нулю, тоді

$$2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0,$$

Або

$$2 - \operatorname{tg}^2 \alpha = 0$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = 2$$

Найвигідніший кут відриву кулі буде дорівнювати:

$$\alpha = 54^\circ 40'$$

Підставивши знайдене значення оптимального кута відриву разом із внутрішнім радіусом барабана розроблювального млина у відповідну формулу, можемо обчислити оптимальне значення кутової швидкості обертання барабана, виражене в радіанах за секунду. Це дозволить визначити умови, за яких система буде максимально ефективною та стабільною в роботі при $R = 0.75$ м.

$$\omega_{\text{опт}} = \frac{2,38}{\sqrt{R}} = \frac{2,38}{\sqrt{0,75}} = 2,75 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Визначення оптимального завантаження барабана

Координати точок, де кулі відриваються від поверхні, а також місця їх падіння значно залежатимуть від кожного окремого шару кулі. Це відбувається через те, що положення цих точок визначається індивідуальними характеристиками шарів і залежним співвідношенням між фізичними властивостями матеріалів і зовнішніми впливами.

$$\omega^2 R = g \cos \alpha$$

або

$$\frac{R}{\cos \alpha} = \frac{g}{\omega^2}$$

$$\frac{g}{\omega^2} = 2p$$

$$R = 2p \cos \alpha$$

Геометричне місце точок падіння куль, позначених як точка В, визначається відповідним радіусом і кутом β у полярній системі координат. Це означає, що координати кожної такої точки залежать від кута β , під котрим падає куля, та її

відстані від певного орієнтовного положення в просторі.

Із графічного зображення (рис. 5.1) видно, що цей процес падіння формується за фіксованим умовами симетрії. Центр та радіус барабана й розташування центра описуваної окружності слугують ключовими орієнтирами, які дозволяють точно визначити це геометричне положення точки падіння. Інтерпретація цих залежностей допомагає зрозуміти природний рух об'єктів у системах із подібною конструкцією та їх подальшу траєкторію руху.

$$\sin\beta = \frac{y_1}{R} = \frac{4R\sin^2\alpha\cos\alpha - R\cos\alpha}{R}$$

Перетворивши вираз, одержимо:

$$\sin\beta = -\cos 3\alpha = \cos(180^\circ - 3\alpha)$$

$$\beta = 3\alpha - 90^\circ$$

Величина кута α для кожного шару куль визначається з рівняння:

$$\cos\alpha_i = \frac{R_i * \omega^2}{g}$$

Таким чином можна побудувати контур руху завантаження й визначити траєкторії руху куль. З аналізу схеми видно, що переповнювати млин кулями настільки ж нераціонально, як і не доповнювати. Практично всі кулі повинні займати 0,3 – 0,35 об'єму барабана.

Вибираємо для нашого млина об'єм мелючих куль рівними 0,34 об'єму барабана.

Розрахунок продуктивності

Питання продуктивності роботи млина є багатофакторним і залежить від цілої низки технічних умов і характеристик. Серед ключових моментів слід відзначити геометричні розміри барабана та мелючих тіл, частоту його обертання, властивості матеріалу для подрібнення та рівномірність його завантаження, якість футерівки внутрішніх поверхонь, роботу аспіраційної системи млина та інші характеристики. Важливим є також кінцевий результат помелу – необхідні тонины частинок матеріалу. Через складність урахування всіх цих факторів аналітичним

шляхом визначення продуктивності млина в кожному конкретному випадку здійснюється за допомогою експериментальних досліджень.

Для млинів періодичної дії продуктивність оцінюють шляхом підрахунку тривалості часу подрібнення певного об'єму матеріалу до досягнення необхідної тонини помелу. Це відбувається через періодичне відбирання зразків для ситового аналізу на різних етапах роботи. У свою чергу, робота млинів неперервної дії безпосередньо залежить від тонини кінцевого продукту. Якщо ситовий аналіз виявляє, що тонина готового матеріалу не відповідає необхідним параметрам, кількість вихідного матеріалу, що падається через порожнисту цапфу, зменшують. Однак це тягне за собою і зменшення загальної продуктивності млина, що вимагає врахування під час розрахунку процесів виробництва.

Продуктивність, т/год:

$$P_p = 6,45 * V * \sqrt{D_0} * \left(\frac{m_{\text{мол}}}{V} \right)^{0.08} * q * K$$

Де V – об'єм камери, м³

$$P_p = 6,45 * 9,54 * \sqrt{1,5} * \left(\frac{13,91}{9,53} \right)^{0.08} * 0,035 * 1 = 2,72 \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Питома продуктивність млина на 1 кВт корисної потужності $q = 0,03 \dots 0,06$ т/(кВт*год), яка збільшується зі зменшенням міцності подрібнюваного матеріалу.

Значення коефіцієнта тонини помелу K залежно від залишку у на ситі №008.

K=1

.Таблиця 5.1 – Залишку на ситі 008

Залишок % на ситі	2	3	4	5	6	7	10	12	15	20
№008	0,59	0,65	0,71	0,77	0,82	0,86	1,0	1,09	1,21	1,42

Визначення потужності приводу млина

Енергія кульового млина витрачається на:

- підняття завантаження на певну висоту;
- повідомлення кінетичної енергії;
- подолання шкідливих опорів для обертання млина необхідно

ВИЗНАЧИТИ МОМЕНТ.

Корисна потужність за будь-якої швидкості Ψ

$$N_{\text{пол}} = 0,867 * \frac{G}{\varphi} * \sqrt{D} * \psi^3 * \left[9 * (1 - k^4) - \frac{16}{3} \psi^4 (1 - k^6) \right] \quad (5.17)$$

де $D = 1.5$ м – внутрішній діаметр млина;

$\varphi = 0,34$ – коефіцієнт заповнення млина тілами, що мелють;

$$G = U * \varphi * \gamma = 0.785 * D^2 * L * I * \gamma \quad (5.18)$$

де $L = 5,4$ м – довжина млина;

$\gamma = 4,56$ т/м³ – насипна вага тіл, що мелють.

$$G = 0,785 * 1,5^2 * 5,4 * 0,34 * 4,56 = 14,78 \text{ т}$$

k – відношення радіуса внутрішнього шару до радіусу зовнішнього шару тіл, що мелють і приймаємо:

$$\varphi = 0,34; \psi = 0,75; k = 0,618$$

$$\begin{aligned} N_{\text{пол}} &= 0,867 * \frac{14,78}{0,34} * \sqrt{1,5} * 0,75^3 * \left[9 * (1 - 0,618^4) - \frac{16}{3} * 0,75^4 (1 - 0,618^6) \right] \\ &= 118,7 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Таким чином, корисна потужність, необхідна для обертання барабана, становить $N_{\text{пол}} = 118.7$ з урахуванням коефіцієнта запасу $K_z = 1.15 \dots 1.20$ (на пускові навантаження та нерівномірність роботи), розрахункова потужність двигуна складає: $N_{\text{розр}} = 118.7 * 1.15 = 136.5$ кВт. Зважаючи на номенклатуру освоєних промисловістю електродвигунів, в установці млина рекомендовано електродвигун типу АИР355М8 з номінальною потужністю $N = 160$ кВт., синхронною частотою обертання $n_{\text{дв}} = 750$ об/хв. Двигун має технічні параметри, наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні параметри електродвигуна

Тип електродвигуна	Потужність, кВт	При номінальному навантаженні			$T_{\text{п}}/T_{\text{но}}$ м	$T_{\text{max}}/T_{\text{но}}$ м	$T_{\text{min}}/T_{\text{но}}$ м
		Ковзання, %	ККД, %	$\cos \varphi$			
АИР355М8	160	2	93.5	0.85	1.2	2	0.9

Трубний млин має велику інерцію, важкий пуск і ударні навантаження на передачу, тому доцільно застосувати трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором (АДКЗ), режим S1, виконання IP55, клас ізоляції, з частотним перетворювачем (VFD) для плавного пуску [7].

Рекомендована синхронна швидкість 6-полюсний, $n_{\text{дв}} \approx 750$ об/хв

$$M = \frac{9550 * 160}{750} = 2037 \text{ Н} * \text{м} = 2,04 * 10^3 \text{ Н} * \text{м}$$

Розрахунок на міцність

Метою розрахунку є перевірка на міцність основних вузлів та сполук кульового млина, розрахунок підшипників, визначення моменту інерції млина.

Розрахунок корпусу

Вихідні дані для двокамерного кульового млина

Найменування	Розмір
Внутрішній діаметр барабана	$D_0 = 1.5 \text{ м}$
Довжина барабана	$L_6 = 5,4 \text{ м}$
Товщина обічайки барабана	$\delta = 0,02 \text{ м}$
Число оборотів млина	$N = 26 \text{ об/хв}$
Ступінь заповнення тілами, що мелють	$\varphi = 0,34$
Середня насипна вага тіл, що мелють	$\gamma = 47 \text{ кН/м}^3$
Відстань між осями підшипника	$L = 6,6 \text{ м}$
Маса кульового завантаження	$m_{\text{ш}} = 13.9 \text{ т}$
Маса обічайки	$m_0 = 3.6 \text{ т}$

Маса фланця центральної частини обічайки	$m_{\phi} = 0.26 \text{ т}$
Маса футерування барабана:	
На довжині $l_1 = 4.3 \text{ м}$	$m_{4.3} = 9.6$
На довжині $l_2 = 1.1 \text{ м}$	$m_{1.1} = 3.4$
Маса розвантажувальної цапфи	
циліндричної частини на довжині $l_2 = 0,71 \text{ м}$	$m_{p.ц} = 2,13 \text{ т}$
кришки на довжині $l_3 = 0,16 \text{ м}$	$m'_{p.ц} = 1,95$
Маса торцевого фланця обічайки з футеровкою	
розвантажувальної частини	$m_p = 1,09 \text{ т}$
завантажувальної частини	$m_3 = 1,09 \text{ т}$
Маса завантажувальної цапфи	
циліндричної частини довжині $l_2 = 0,83 \text{ м}$	$m_{з.ц} = 2,47 \text{ т}$
кришки на довжині $l_3 = 0,16 \text{ м}$	$m'_{з.ц} = 1,95$
маса зубчастого вінця	$m_{в} = 2,65 \text{ т}$

Визначення навантажень

Поступово розподілені навантаження по довжині млина визначаємо за формулою:

$$g_i = \frac{m_i * g}{l_i} \quad (5.30)$$

де m_i – маса і-го елемента млина, т;

l_i – довжина і-го елемента, м.

Навантаження від ваги циліндричної цапфи розвантажувальної

$$g_1 = \frac{2,13 * 9,81}{0,71} = 29,43 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$g_6 = \frac{2,47 * 9,81}{0,83} = 29,19$$

Від ваги кришки розвантажувальної (завантажувальної) цапфи

$$g_2 = g_5 = \frac{1,95 * 9,81}{0,16} = 119.56 \text{ кН/м}$$

Від ваги обічайки:

$$g_0 = \frac{3,6 * 9,81}{5,4} = 6,54 \text{ кН/м}$$

Від ваги футерування на довжині обичайки

$$g'_{\phi} = \frac{9,6 * 9,81}{4,3} = 21,9 \text{ кН/м}$$

$$g''_{\phi} = \frac{3,4 * 9,81}{1,1} = 30,32 \text{ кН/м}$$

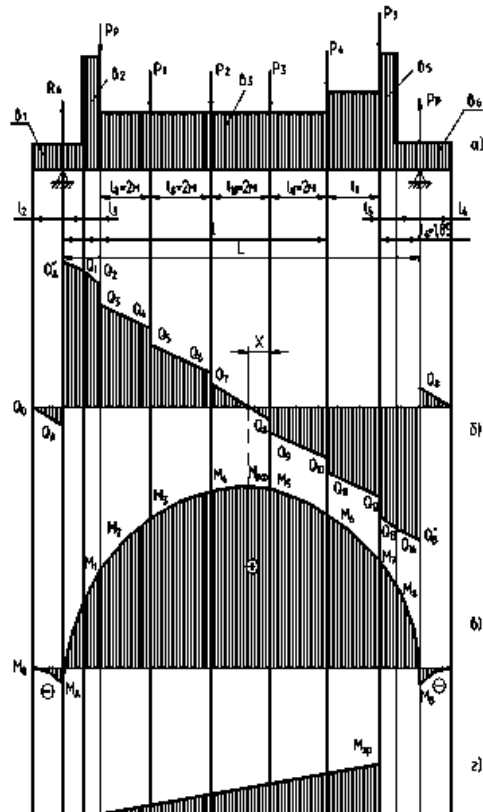


Рисунок 5.2. а) розрахункова схема млина; б) епюра поперечних сил; в) епюра згинальних моментів; г) епюра крутних моментів.

Враховуючи, що сила тяжкості матеріалу, що розмелюється, становить 14% від сили тяжіння тіл, що мелють, рівномірно розподілене навантаження від даних сил складає:

$$g_m = \frac{13,9 * 1,14 * 9,81}{5,4} = 28,78 \text{ кН/м}$$

Сумарне навантаження на довжині обичайки 4,3 м:

$$g_3 = g_0 + g'_{\phi} + g_m = 6,54 + 21,9 + 28,78 = 57,25 \text{ кН/м} \quad (5.31)$$

на довжині 1,1 м:

$$g_4 = g_0 + g''_{\phi} + g_m = 6,54 + 30,32 + 28,78 = 65,67 \text{ кН/м}$$

Зосередження навантаження:

Від ваги фланців центральної частини обічайки:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 2 * 9,81 = 19,6 \text{ кН}$$

Від ваги торцевого фланця з футеруванням

$$P_0 = 1,09 * 9,81 = 10,69 \text{ кН}$$

Від ваги торцевого фланця з футеровкою та зубчастим вінцем

$$(\text{завантажувальна частина}) P_3 = (1,09 + 2,65) * 9,81 = 36,7 \text{ кН}$$

Реакція у підшипниках

$$\begin{aligned} R_A = & \frac{1}{L} * \left[g_1 * l_2 \left(\frac{l_2}{2} + L - l_1 + l_3 \right) + g_2 * l_3 * \left(\frac{l_3}{2} + L - l_1 \right) + P_p * \right. \\ & (L - l_1) + g_3 * l * \left(\frac{l}{2} + l_1 + l_6 \right) + P_1 * (L - l_8 - l_1) + P_2 * (l_{10} + l_{11} + l_1 + l_6) + \\ & P_3 * (l_{11} + l_{11} + l_6) + P_4 * (l_1 + l_6) + g_4 * l_1 \left(\frac{l_1}{2} + l_6 \right) + g_5 * l_5 * \left(\frac{l_5}{2} + l_6 - l_5 \right) + \\ & P_3 * l_6 + g_6 * \frac{(l_6 - l_5)^2}{2} - g_6 * \frac{(l_4 + l_5 - l_6)^2}{2} \left. \right] = \frac{1}{6,6} * \left[29,43 * 0,71 \left(\frac{0,71}{2} + 6,6 - 4,3 + \right. \right. \\ & 0,16 \left. \right) + 119,56 * 0,16 \left(\frac{0,16}{2} + 6,6 - 5,3 \right) + 10,69(6,6 - 4,3) + 57,25 * \\ & 4,3 \left(\frac{4,3}{2} + 4,3 + 1,1 \right) + 65,67 * 4,3 \left(\frac{4,3}{2} + 0,71 \right) + 119,56 * 0,16 \left(\frac{0,16}{2} + 0,71 - \right. \\ & 0,16 \left. \right) + 36,7 * 0,71 + 29,19 * \frac{(0,71 - 0,16)^2}{2} - 29,19 \frac{(0,83 + 0,16 - 0,71)^2}{2} \left. \right] = 147 \approx 150 \text{ кН} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_B = & \frac{1}{L} * \left[g_6 * l_4 \left(\frac{l_4}{2} + L - l_6 + l_5 \right) + g_5 * l_5 * \left(\frac{l_5}{2} + L - l_6 \right) + g_4 * l_1 \right. \\
& * \left(\frac{l_1}{2} + l + l_1 \right) + P_4 * (l + l_1) + P_4(l + l_1) + P_3 * (l_1 + l_8 + l_9 + l_{10}) \\
& + P_2 * (l_1 + l_8 + l_9) + P_1(l_1 + l_8) + g_3 * l * \left(\frac{l}{2} + l_1 \right) + g_2 \\
& * l_3 \left(\frac{l}{2} + l_1 - l_3 \right) + P_3(L - l_6) + P_3(L - l_6) + P_p * l_1 + g_1 * \frac{(l_1 - l_3)^2}{2} \\
& \left. - g_1 * \frac{(l_2 + l_3 - l_1)^2}{2} \right] \\
= & \frac{1}{6.6} \\
& * \left[29.19 * 0.83 \left(\frac{0.83}{2} + 6.6 - 0.71 + 0.16 \right) + 119.56 * 0.16 \right. \\
& * \left(\frac{0.16}{2} + 6.6 - 0.71 \right) + 65.67 * 4.3 \left(\frac{4.3}{2} + 4.3 + 1.1 \right) + 57.25 \\
& * 4.3 \left(\frac{4.3}{2} + 4.3 \right) + 36.7(6.6 - 0.71) + 10.69 + 29.43 * \frac{(4.3 - 0.16)^2}{2} \\
& \left. - 29.43 \frac{(0.71 + 0.16 - 1.1)^2}{2} \right] = 210 \text{ кН}
\end{aligned}$$

Перерізуючи сили за перерізами:

$$Q_0 = 0$$

$$Q'_1 = -q_1(l_2 + l_3 - l_1) = -29,43 * (-3,43) = 100,94 \text{ кН}$$

$$Q''_1 = -q_1(l_2 + l_3 - l_1) + R_A = -29,43 * (-3,43) + 150 = 250,94 * \text{кН}$$

$$Q_1 = -q_1 * l_2 + R_A = -29,43 * 0,71 + 150 = 129,10 \text{ кН}$$

$$Q_2 = Q_1 - q_1 * l_3 = 129,10 - 29,43 * 0,16 = 124,39 \text{ кН}$$

$$Q_3 = Q_2 - P_p = 124,39 - 10,69 = 113,70 \text{ кН}$$

$$Q_4 = Q_3 - q_3 * l_8 = 113,70 - 55,36 * 1,1 = 52,80 \text{ кН}$$

$$Q_5 = Q_4 - P_1 = 52,80 - 19,6 = 33,20 \text{ кН}$$

$$Q_6 = Q_5 - q_3 * l_9 = 33,20 - 55,36 * 1,1 = -27,70 \text{ кН}$$

$$Q_7 = Q_6 - P_2 = -27,70 - 19,6 = -47,30 \text{ кН}$$

$$Q_8 = Q_7 - q_3 * l_{10} = -47,30 - 55,36 * 1,1 = -108,20 \text{ кН}$$

$$Q_9 = Q_8 - P_3 = -108,20 - 36,7 = -144,90 \text{ кН}$$

$$Q_{10} = Q_9 - q_3 * l_{11} = -144,90 - 55,36 * 1,1 = -205,80 \text{ кН}$$

$$Q_{11} = Q_{10} - P_4 = -205,80 - 19,6 = -225,40 \text{ кН}$$

$$Q'_B = q_6 * (l_4 + l_5 - l_6) = 29,19 * 0,28 = 8,17 \text{ кН}$$

$$Q''_B = Q'_B - R_B = 8,17 - 210 = -201,83 \text{ кН}$$

$$Q_{14} = q_6 * l_4 - R_B = 29,19 * 0,83 - 210 = -185,77 \text{ кН}$$

$$Q_{13} = Q_{14} + q_5 * l_5 = -185,77 + 119,56 * 0,16 = -166,64 \text{ кН}$$

$$Q_{12} = Q_{13} + P_3 = -166,64 + 36,7 = -129,94 \text{ кН}$$

Згинальні моменти за перерізами:

$$M_0 = 0$$

$$M_A = -\frac{g_1 * (l_2 + l_3 - l_7)^2}{2} = -\frac{29.43(0.71 + 0.16 - 1.1)^2}{2} = -4.162 \text{ кН * м}$$

$$M_1 = -\frac{g_1 * l_2^2}{2} + R_A * (l_7 - l_3) = -\frac{29.43 * 0.71^2}{2} + 150 * (1.1 - 0.16) \\ = 133,58 \text{ кНм}$$

$$M_2 = -g_1 * l_2 * \left(\frac{l_2}{2} + l_3\right) + R_A * l_7 - \frac{g_2 * l_3^2}{2} \\ = -29.43 * 0.71 * \left(\frac{0.71}{2} + 0.16\right) + 150 * 1.1 - \frac{119.56 * 0.16^2}{2} \\ = 152,71 \text{ кН * м}$$

$$M_3 = -g_1 * l_2 * \left(\frac{l_2}{2} + l_3 + l_8\right) + R_A * (l_7 + l_8) - g_2 * l_3 * \left(\frac{l_3}{2} + l_8\right) - P_p * l_8 \\ - \frac{g_3 * l_8^2}{2} \\ = -29.43 * 0.71 * \left(\frac{0.71}{2} + 0.16 + 1.1\right) + 150 * (1.1 + 1.1) - 119.6 \\ * 0.16 * \left(\frac{0.16}{2} + 1.1\right) - 10.69 * 1.1 - \frac{55.36 * 1.1^2}{2} = 228,45 \text{ кН * м}$$

$$\begin{aligned}
M_4 &= -g_1 * l_2 * \left(\frac{l_2}{2} + l_3 + l_8 + l_9\right) + R_A * (l_7 + l_8 + l_9) - g_2 * l_3 \left(\frac{l_3}{2} + l_8 + l_9\right) \\
&\quad - P_p(l_8 + l_9) - g_3 * l_8 * \left(\frac{l_8}{2} + l_9\right) - g_3 * \frac{l_9^2}{2} \\
&= -29.43 * 0.71 * \left(\frac{0.71}{2} + 0.16 + 1.1 + 1.1\right) + 150 * (1.1 + 1.1 + 1.1) \\
&\quad - 119.56 * 0.16 * \left(\frac{0.16}{2} + 1.1 + 1.1\right) - 10.69 * (1.1 + 1.1) - 55.36 \\
&\quad * 1.1 * \left(\frac{1.1}{2} + 1.1 + 1.1\right) - 55.36 * \frac{1.1^2}{2} = 237,16 \text{ кН} * \text{м} \\
M_B &= -\frac{g_6 * (l_5 + l_1 - l_6)^2}{2} = -\frac{29.19 * (0.16 + 4.3 - 0.71)^2}{2} = -205,24 \text{ кН} * \text{м} \\
M_8 &= -\frac{g_6 * l_4^2}{2} + R_B * (l_6 - l_5) = -\frac{29.19 * 0.83^2}{2} + 210 * (0.71 - 0.16) \\
&= 105,44 \text{ кН} * \text{м} \\
M_7 &= -g_6 * l_4 * \left(\frac{l_4}{2} + l_5\right) - \frac{g_5 * l_5^2}{2} + R_B * l_6 = -29.19 * 0.83 * \\
&\left(\frac{0.83}{2} + 0,16\right) - \frac{119,56 * (0,16)^2}{2} + 210 * 0,71 = 133,64 \text{ кН} * \text{м} \\
M_6 &= -g_6 * l_4 * \left(\left(\frac{l_4}{2} + l_5 + l_1\right) + R_B * (l_6 + l_1)\right) - g_5 * l_5 * \left(\frac{l_5}{2} + l_1\right) - P_3 * l_1 - g_4 \\
&\quad * \frac{l_1^2}{2} \\
&= -29.19 * 0.83 * \left(\frac{0.83}{2} + 0.16 + 4.3\right) + 210 * (1.1 + 4.3) - 36.7 * 4.3 \\
&\quad - 63.78 * \frac{4.3^2}{2} = 269 \text{ кН} * \text{м}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_5 &= -g_6 * l_4 * \left(\frac{l_4}{2} + l_{11} + l_5 + l_1 \right) + R_B * (l_{11} + l_6 + l_1) - g_5 * l_5 * \left(\frac{l_5}{2} + l_1 + l_{11} \right) \\
&\quad - g_3 * l_{11} * \left(\frac{l_{11}}{2} + l_1 \right) - g_3 * \frac{l_{11}^2}{2} \\
&= -29.19 * 0.83 * \left(\frac{0.83}{2} + 1.1 + 0.16 + 4.3 \right) + 210 \\
&\quad * (1.1 + 0.71 + 4.3) - 119.56 * 0.16 * \left(\frac{0.16}{2} + 4.3 + 1.1 \right) - 55.36 \\
&\quad * 1.1 (0.55 + 4.3) - 55.36 * \frac{1.1^2}{2} = 705 \text{ кН * м}
\end{aligned}$$

Абсциса максимального згинального моменту:

$$X = \frac{|Q_8|}{g_3} = \frac{108.2}{55.36} = 1.954 \text{ м}$$

Максимальний згинальний момент:

$$\begin{aligned}
M_{max} &= -g_6 * l_4 * \left(\frac{l_4}{2} + l_5 + l_1 + l_{11} - x \right) + R_B * (l_6 + l_1 + l_{11} + x) - g_5 * l_5 \\
&\quad * \left(\frac{l_5}{2} + l_1 + l_{11} + x \right) - g_3 * l_{11} * \left(\frac{l_{11}}{2} + x \right) - g_3 * \frac{x^2}{2} \\
&= -29.19 * 0.83 * \left(\frac{0.83}{2} + 0.16 + 4.3 + 1.1 - 1.95 \right) + 210 \\
&\quad * (0.71 + 0.16 + 1.1 + 1.95) - 119.56 * 0.16 \\
&\quad * \left(\frac{0.16}{2} + 4.3 + 1.1 + 1.95 \right) - 55.36 * 1.1 \left(\frac{1.1}{2} + 1.95 \right) - 55.36 * \frac{1.95^2}{2} \\
&\quad + 150 * (1.95 - 0.16 - 0.71 - 1.1) = 705 \text{ кН * м}
\end{aligned}$$

Визначення напруг

Для визначення максимального нормального значення напруги знайдемо коефіцієнт ослаблення перерізу барабана отворами під футерувальні болти та люки:

$$C = \frac{\sum b_i}{\pi * D_0}$$

де $\sum b_i = 1,84 \text{ м}$ – сумарна ширина отворів у поперечному перерізі барабана,м

$$C = \frac{1,84}{3,14 * 1,5} = 0,39$$

Момент опору перерізу:

$$W = \pi * R_{cp}^2 * \delta$$

де R_{cp} – середній радіус барабана, м

$$W = 3.14 * 0.75^2 * 0.02 = 0.035 \text{ м}^3$$

Розрахунковий момент опору:

$$W_p = W * (1 - C)$$

$$W_p = 0.035 * (1 - 0.39) = 0.021 \text{ м}^3$$

Нормальну напругу в обичайці визначаємо за формулою:

$$G_1 = \frac{M}{W_p} * \cos \beta$$

де M – максимальний згинальний момент у прокаті ($M = 705 \text{ кН*м}$)

$$\beta = 0,$$

$$G_1 = \frac{705 * 10^{-3}}{0.021} * \cos 0^\circ = 33.6 \text{ Мпа}$$

$$\beta = \pi/2$$

$$G_1 = \frac{705 * 10^{-3}}{0.021} * \cos \frac{\pi}{2} = 0$$

$$\beta = \pi$$

$$G_1 = \frac{707 * 10^{-3}}{0.021} * \cos \pi = -33.6 \text{ Мпа}$$

Основні та кільцеві напруги визначаємо за формулами:

$$\sigma_2 = \frac{8 * \rho_m * g * l^2 * 10^{-3}}{\delta} * \sum n \sum m * \frac{m * n^2 * \omega_n}{m^4 * \pi^4 + \frac{n^4(n^2 - 1)^2 * \delta^2 * l^4}{n * R^6}} * \sin \frac{m\pi * Z}{l} * \cos n * \beta$$

$$\sigma_3 = \frac{4 * \rho_m * l^4 * 10^{-3}}{\pi^2 * R^3} * \sum n \sum m * \frac{n^4 * (n^2 - 1) * \omega_n}{m * (m^4 * \pi^4 + \frac{n^4(n^2 - 1)^2 * \delta^2 * l^4}{R * R^6})} * \sin \frac{m\pi * Z}{l} * \cos n * \beta$$

де $n = 2, 3, 4, \dots$,

$m = 1, 3, 5, 7, \dots$,

$l = 0,85 * 5,4 = 4,59$ м – розрахункова довжина обічайки,

$R = 0,75$ м – середній радіус обічайки,

$\delta = 0,02$ м – товщина обічайки,

β - кут відраховується від вертикального діаметра знизу вгору.

Максимальні розрахункові напруги отримали при $\beta = 0$;

$\sigma_2 = 14,8$ Мпа; $\sigma_3 = -13,7$ Мпа

Наведені напруги визначаємо за IV теорією міцності:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1 + \sigma_2) * \sigma_3}$$

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(33,6 + 14,8)^2 + 13,7^2 - (33,6 + 14,8) * 13,7} = 43,21 \text{ Мпа}$$

Напруги задовольняють умовам, вони менші за допустимі.

Розрахунок болтів кріплення сегмента до торцевої кришки

Сегмент кріпиться до торцевої кришки 16 ботами класу міцності 10,9М64.

Межа плинності болтів за ГОСТ 1759-70 $\sigma_m = 883$ Мпа.

Торцева кришка кріпиться до барабана млина 64 болтами М64. Зовнішнє навантаження на i -й болт з'єднання дорівнює:

$$P_i = \frac{M * Z_i}{\sum_{i=1}^m Z_i * r_i^2}$$

Де $M = 877,32$ кН*м – згинальний момент, що сприймається болтовими з'єднаннями;

Z_i – число болтів, розташованих на відстані r_i від осі;

M – число болтів.

$$P_i = \frac{M * R * \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^m R^2 * \sin^2 \varphi_i}$$

Де $R = 0.75$ м;

$\varphi_i = 2\pi/m$;

$$P_i = \frac{2 * M * \sin \varphi_i}{R * m} = \frac{2 * 105,44}{0,75 * 16} = 17.57 \text{ кН}$$

На болтове з'єднання сегмент торцевої кришки діє згинальний момент:

$$M^* = \sum_{k=1}^{18} P_k * h_k = 17.57 * 0,85 = 14.93 \text{ кН}$$

де $h_k = 0,85$ м

P_k – визначається за формулою P_i

Зусилля, що припадає на болт, знаходимо за формулою:

$$P^* = \frac{M^*}{n * l} = \frac{14.93}{16 * 0,1} = 9.33 \text{ кН}$$

де $n = 16$ – число болтів в стику;

$l = 0,1$ м – відстань від осі болтового з'єднання до осі повороту стику.

Розрахунок величини зусилля P^* зведено таблицею 4.4. Крім згинального моменту M^* болти, що з'єднують сегмент з кришкою, сприймають частину перекриваючої сили $Q = 1570,04$ кН, що діє між кришкою і корпусом млина.

У цьому випадку на кожен болт з'єднання діє сила, що розтягує:

$$Q^* = \frac{Q * Z_{np}}{n * m_{np}}$$

$$Q^* = \frac{225 * 9}{32 * 16} = 3.96 \text{ кН}$$

$m_{np} 32$

– загальна кількість болтів кріплення в поєднанні кришка корпус млина;

Z_{np}

$= 9$ – кількість призонних болтів, що з'єднують сегмент із корпусом млина.

Сумарне навантаження від дії зовнішніх сил, що припадає на один болт,

дорівнює:

$$P_6 = P^* + Q^* = 9.33 + 3.96 = 13.29 \text{ кН}$$

З умови точності стику зусилля затягування має дорівнювати:

$$T_6 = K(1 - X)P_6$$

№ болта До	$\varphi_{\text{до}}$ (Рад)	$\sin\varphi_{\text{до}}$	P_k (кН)	h_k (м)	M^* (КНМ)	P^*
1, 17	0,785	0,707	12.42	0,135		
2, 16	0,883	0,773	13.58	0,296		
3, 15	0,982	0,831	14.60	0,438		
4, 14	1,080	0,882	15.49	0,562		
5, 13	1,178	0,924	16.23	0,665	105.44	33.7
6, 12	1,276	0,957	16.81	0,745		
7, 11	1,374	0,981	17.24	0,803		
8, 10	1,473	0,995	14.48	0,838		
9	1,571	1	17.57	0,85		

Де $K=2,5$ – коефіцієнт затяжки для змінного навантаження;

$X=0,2$ – коефіцієнт зовнішнього навантаження.

$$T_6 = 2,5(1 - 0,2) * 13.29 = 26.58 \text{ кН}$$

Повне осьове зусилля в болті:

$$Q = T_6 + XP_6$$

$$Q = 26.58 + 0.2 * 13.29 = 29.238 \text{ кН}$$

Найбільший момент, що крутить, що діє на болт при затягуванні:

$$M_{\text{кр}} = \xi * T_6 * d_1$$

Де ξ - коефіцієнт залежить від тертя на навантаженні $\xi = 0,17$.

$D = 0.064 \text{ м}$ – зовнішній діаметр.

$$M_{кр} = 0,17 * 26.58 * 0,064 = 0.289 \text{ кН} * \text{м}$$

Нормальна напруга:

$$\sigma = \frac{Q}{F_c}$$

$$\text{Де } F_c = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{3.14 * 0.064^2}{4} = 0.003215 \text{ м}^2$$

$$\sigma = \frac{29.24 * 10^3 *}{0.003215} = 9.09 \text{ Мпа}$$

Дотична напруга:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{0.2 * d_c^3}$$

$$\tau = \frac{289}{0.2 * 0.000262144} = 5.51 \text{ Мпа}$$

Запас міцності по деформаціям:

$$n = \frac{\sigma_m}{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}$$

$$n = \frac{883 * 0.8}{\sqrt{82.6^2 + 91.08^2}} = 53.6$$

Максимальний запас міцності, що допускається за мастичними деформаціями [n] = 1,5, що задовольняє умовам.

Розрахунок втомної міцності

Розрахунок міцності втоми виконується в припущенні, що зовнішнє навантаження змінюється симетричному циклу.

Змінна напруга (амплітуда циклу).

$$\sigma_a = \sigma_v = \frac{x * P_6}{F_c} = \frac{0.2 * 13.29 * 10^{-3}}{0.003215} = 0.827 \text{ Мпа}$$

Середня напруга циклу:

$$\sigma_m = \frac{T_6}{F_c} + \sigma_v$$

$$\sigma_m = \frac{26580}{0.003215} + 12 = 9.10 \text{ Мпа}$$

Запас міцності різьбового з'єднання:

$$n_a = \frac{\sigma_{-1Д}}{\sigma_a} * \sqrt{1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_B}}$$

Де

$\sigma_{-1Д} = \frac{\sigma_{-1P}}{R_\sigma}$ - межа витривалості з'єднання при симетричному циклі.

$\sigma_{-1P} = 273$ Мпа – межа витривалості матеріалу болта при симетричному циклі.

K_σ - ефективний коефіцієнт при симетричному циклі навантаження:

$$K_\sigma = 1 + g(a\sigma - 1)$$

Де g – коефіцієнт чутливості матеріалу болта до концентрації напруг;

$g = 0.5 - 0.6$ – для вуглецевих сталей;

$a\sigma$ - теоретичний коефіцієнт концентрації напруг

$$a\sigma = 1 + 0.55 \sqrt{\frac{d}{R_\sigma}} = 1 + 0.55 \sqrt{\frac{64}{2}} = 4,11$$

$R_\sigma = 2$ мм – радіус під головкою болта.

$$K_\sigma = 1 + 0.5(4,11 - 1) = 2,555$$

$$\sigma_{-1Д} = \frac{273}{2,555} = 106,84 \text{ Мпа}$$

$$n_a = \frac{a - 1}{a_a} \sqrt{1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_B}} = \frac{106.84}{0.83} \sqrt{1 - \frac{9.10}{981}} = 128$$

Задовольняє умовам.

Розрахунок підшипників ковзання

Розрахунок підшипника за характеристикою PV.

Максимальна опорна реакція:

$$R_{max} * R_b = 210 \text{ кН}$$

Діаметр цапфи $d_{ц} = 0,8 * 1,5 = 1,2$ м

Кут контакту $2\beta = 120^\circ$

Робоча довжина підшипника $l = 0,8 * 1,2 = 0,96$ м

Матеріал підшипника бабіт Б16

Питомий тиск визначаємо за такою формулою:

$$P = \frac{R_{max}}{l * d_{ц} * \sin\beta} = \frac{210 * 10^{-3}}{0,96 * 1,2 * 0,866} = 0,210 \text{ Мпа}$$

Окружна швидкість цапфи:

$$v = \frac{\pi * d_{ц} * n}{60} = \frac{3,14 * 1,2 * 26}{60} = 1,63 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Твір «PV»

$$PV = 0,210 * 1,63 = 0,342 \text{ Мпа} * \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Для бабіта Б16 граничне значення

$[P] = 10$ Мпа

$[v] = 12$ м/с

$[PV] = 10$ Мпа * м/с

5.2 Розрахунки приводу

Кінематичний розрахунок потрібен для визначення передаточний чисел механізму приводу, які узгоджують високу швидкість обертання валу електродвигуна з низькою робочою швидкістю барабана млина.

Розрахунок відкритої зубчастої передачі (вінець-шестерня)

Це найбільш відповідальний вузол приводу, що працює у важких умовах (відкрите середовище, пил, високі навантаження).

Порівняльний аналіз методів розрахунку

У інженерній практиці проєктування важких млинів історично склалося декілька відмінних методів розрахунку вінцевих передач.

1. Методики НКМЗ та ЦНИИТМАШ. Галузеві стандарти важкого машинобудування, які вводять специфічні коефіцієнти, що враховують динаміку

приводу, точність виготовлення великогабаритних коліс та умови експлуатації.

2. Методика Гіпровуглемаш. Спеціалізована методика, яка, крім міцності, приділяє Методика ЕНІМС. Класичний підхід, орієнтований на розрахунок за контактними напруженнями (витривалість поверхні зубів) та напруженнями згину.

3. увагу прогнозуванню зносу зубців, що є критичним для відкритих передач, які працюють в абразивному середовищі.

4. Сучасні стандарти (ISO 6336/ДСТУ). Узагальнюють ці підходи, пропонуючи найбільш повну модель розрахунку, що враховує коефіцієнти навантаження, динаміки, розподілу навантаження по ширині вінця та ін.

Для даного проєкту будемо використовувати основні положення ДСТУ (аналог ISO 6336), який є найбільш повним. Розрахунок ведеться за двома критеріями: контактна міцність та міцність на згин [9].

Вихідні дані для розрахунку:

Крутний момент на шестерні

$$M_{\text{шест}} \frac{9550 \cdot N_{\text{дв}}}{n_{\text{шест}}} = \frac{9550 \cdot 160}{196} = 7796 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Частота обертання шестерні:

$$n_{\text{шест}} = n_{\text{роб}} \cdot U_{\text{відкр}}$$

$$n_{\text{шест}} = 26.1 \cdot 7.5 = 195.75 = 196 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Частота обертання вінця: $n_{\text{шест}} = 196 \text{ об/хв}$

Передаточне число: $U_{\text{відкр}} = 7.5$

Проектний розрахунок (за контактною міцністю).

Для забезпечення частоти обертання шестерні $n_{\text{шест}} = 196 \text{ об/хв}$ від електродвигуна з $n_{\text{дв}} = 750 \text{ об/хв}$ застосовується стандартний редуктор.

Загальне передаточне число приводу:

$$U_{\text{заг}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{шест}}}$$

$$U_{\text{зар}} = \frac{750}{196} = 3.83$$

Приймаємо стандартний двоступеневий циліндричний редуктор типу Ц2У з передаточним числом $U_{\text{ред}} = 4.0$ (найближче стандартне значення).

Визначаємо міжосьову відстань:

$$a_w = (U + 1) * \sqrt[3]{\frac{310^2 * K_H * M_{\text{шест}}}{U * \psi_{ba} * [\sigma_H]^2}} \quad (5.37)$$

$$a_w = (7.5 + 1) * \sqrt[3]{\left(\frac{310^2 * 1.3 * 7796}{7.5 * 0.25 * [520]^2}\right)} = 1057 \text{ мм} = 1060 \text{ мм}$$

$$M_{\text{вінця}} = M_{\text{шестр}} * U$$

$$M_{\text{вінця}} = 7796 * 7.5 * 0.95 = 55546.5 \text{ Н} * \text{м}$$

Матеріал вінця Сталь 40ХЛ $\sigma_B=750$ МПа; матеріал шестерні Сталь 40Х $\sigma_B=900$ МПа

Допустимі напруження $\sigma_H=520$ МПа

$$\psi(ba) = \frac{b_w}{A} * a_w \approx 0.25$$

K_H – коефіцієнт навантаження

Проводимо інтеграційний розрахунок і визначаємо:

На 1 ступені модуль зачеплення $m = 16$ мм;*

Число зубців шестерні $z_1 = 16$;

Число зубців вінця.

$$z_2 = U * z_1 \quad (5.38)$$

$$z_2 = 7.5 * 16 = 120$$

Геометричні параметри:

Ділильний діаметр шестерні:

$$d_1 = m * Z_1 \quad (5.39)$$

$$d_1 = 16 * 16 = 256 \text{ мм}$$

Ділильний діаметр вінця:

$$d_2 = m * Z_2 \quad (5.40)$$

$$d_2 = 16 * 120 = 1920 \text{ мм} = 1.92 \text{ м}$$

Міжосьова відстань:

$$a_w = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5.41)$$

$$a_w = \frac{256 + 1920}{2} = 1088 \text{ мм}$$

Ширина вінця:

$$b_w = \psi_{ba} * a_w \quad (5.42)$$

$$b_w = 0.25 * 1088 = 272 \text{ мм}$$

Отриманий діаметр вінця $d_2 = 1.92 \text{ м}$ є більшим за діаметр барабана $D_n = 1,5 \text{ м}$, що відповідає типовій конструкції барабанних млинів така конструкція забезпечує необхідний зазор для кріплення вінця та передачу крутного моменту.

Перевірочний розрахунок на міцність при згині:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{d_w * m} * Y_F * Y_S * K_F \leq [\sigma_F] \quad (5.44)$$

Де Y_F , Y_S – коефіцієнти форми зуба та концентрації напружень;

$[\sigma_F]$ – допустиме напруження згину.

Окружна сила:

$$F_t = \frac{2 * M_{\text{вінця}}}{d_2} \quad (5.45)$$

$$F_t = \frac{2 * 55546.5}{1.92} = 57861 \text{ Н}$$

$$F_r = 0.384 * F_t \quad (5.46)$$

$$F_r = 0.384 * 57861 = 22219 \text{ Н}$$

Проводиться розрахунок, який підтверджує, що $\sigma_F < [\sigma_F]$ для обраних матеріалів та модуля $m = 16 \text{ мм}$.

Розрахунок теплового балансу.

Практично вся потужність, що підводиться до млина, в кінцевому рахунку перетворюється на тепло (через тертя та деформацію матеріалу) $N_{\text{тепл}}$, за винятком

енергії, що йде на створення нових поверхонь ($N_{\text{подр.кор}}$), яка є дуже малою (ККД млина 1-3%. Приймаємо, що приблизно 95% потужності на валу переходить у тепло.

$$N_{\text{тепл}} = N_{\text{вал}} * 0,95$$

$$N_{\text{тепл}} = 160 * 0,95 = 152 \text{ кВт}$$

Це тепло йде на нагрів матеріалу, корпусу млина та повітря. Частина тепла розсіюється корпусом $Q_{\text{розс}}$, частина виноситься матеріалом $Q_{\text{мат}}$ та $Q_{\text{пов}}$.

Площа поверхні барабану:

$$S_{\text{бар}} = \pi * D_n * L_n + 2 * \left(\frac{\pi * D_n^2}{4} \right) \quad (5.64)$$

$$S_{\text{бар}} = 3.14 * 1.5 * 5.4 + 2 * \left(\frac{3.14 * 1.5^2}{4} \right) = 28,96 \text{ м}^2$$

Розрахунок тепловіддачі показує, що природної конвекції недостатньо для розсіювання 152 кВт, що призведе до перегріву млина вище 100 – 120 °С.

Розрахунок пилогазовідводу. Система аспірації є критично важливою. Вона повинна не лише видаляти пил, але й відводити тепло [2].

Кількість тепла, яку має винести аспіраційне повітря:

$$Q_{\text{пов}} = N_{\text{тепл}} - Q_{\text{розс}} - Q_{\text{мат}} \quad (5.65)$$

Враховано:

$$N_{\text{тепл}} = 0,6 * 152 = 91.2 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{пов}} = L_{\text{асп}} * c_p * (T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}}) \quad (5.66)$$

Де c_p – теплоємність повітря $T_{\text{п}}=1,0 \text{ кДж/кг*К}$

Приймаємо: $T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}} = \Delta T = (100 - 20) = 80 \text{ К}$

$$L_{\text{асп}} \frac{91.2}{1,2 * 80} = 0.95 \text{ м}^3/\text{с}$$

6. ЧИСЛОВІ РОЗРАХУНКИ

6.1 Побудова базової моделі «барабан»

Початок моделювання починаємо зі створення нового ескізу «Sketch» та витягуємо наш ескіз через команду «Boss-Extrude». Рисунок 6.1

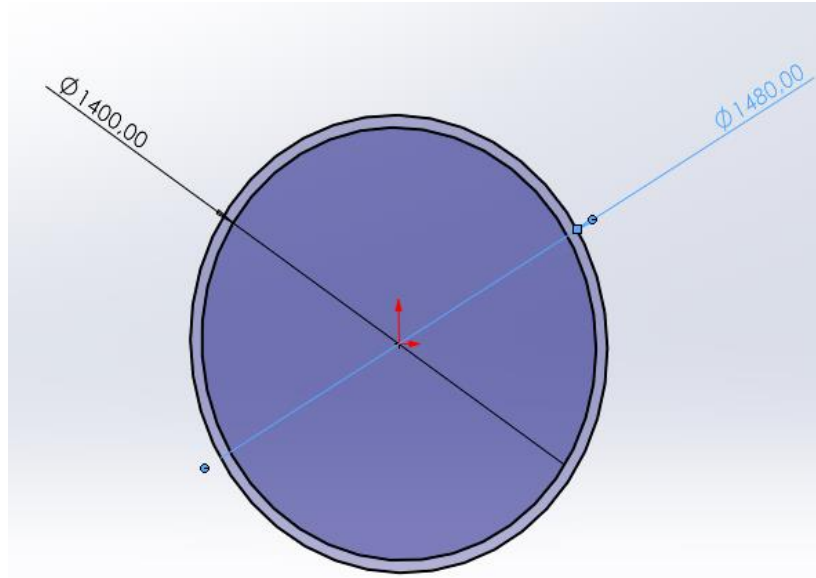


Рисунок 6.1 – операція «Boss-Extrude»

Побудова базової моделі «решітка»

Початок моделювання починаємо зі створення нового ескізу «Sketch» та витягуємо наш ескіз через команду «Boss-Extrude». Рисунок 6.2

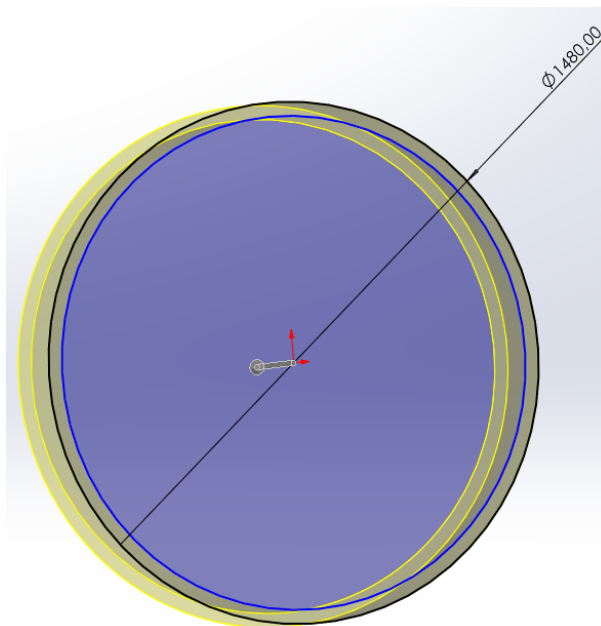


Рисунок 6.2 – операція «Boss-Extrude»

Робимо перегородку та завдяки команді «Circular Sketch Pattern» робимо круговий масив Рисунок 6.3

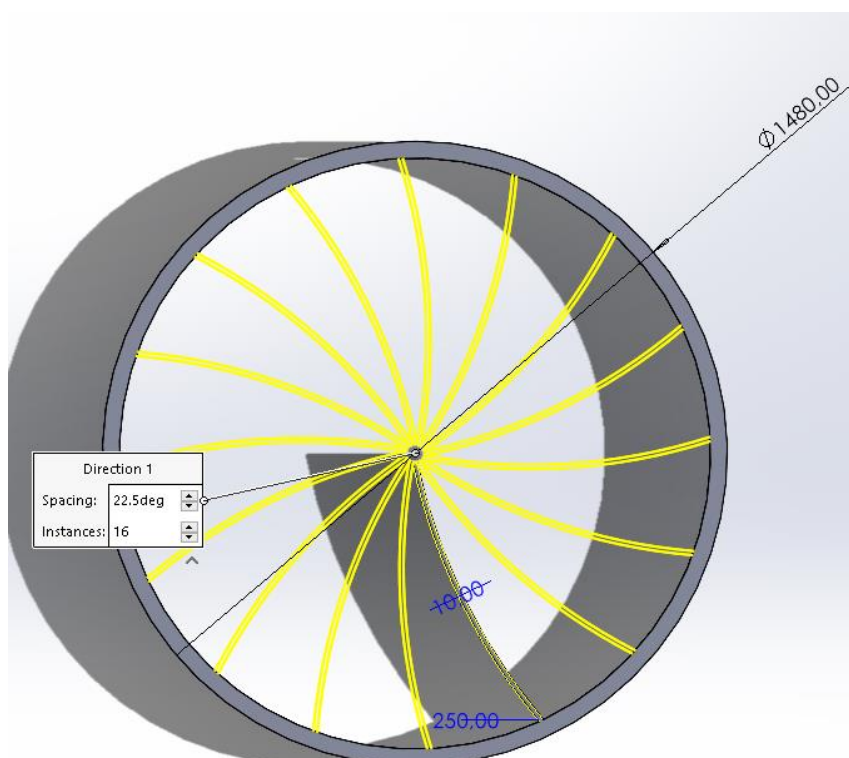


Рисунок 6.3 – операція «Circular Sketch Pattern»

Робимо центральну решітку, за допомогою команд «Circle» та «Line»
Рисунок 6.4

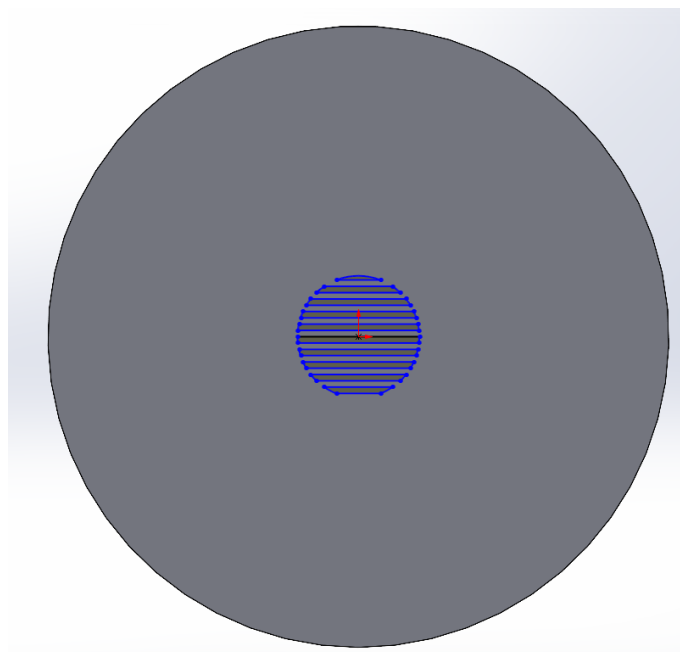


Рисунок 6.4-смусні команди «Circle» та «Line»

Робимо решітку , та за допомогою коад «Strainght slot» та «Circular Sketch Pattern» робимо круговий масив Рисунок 6.5

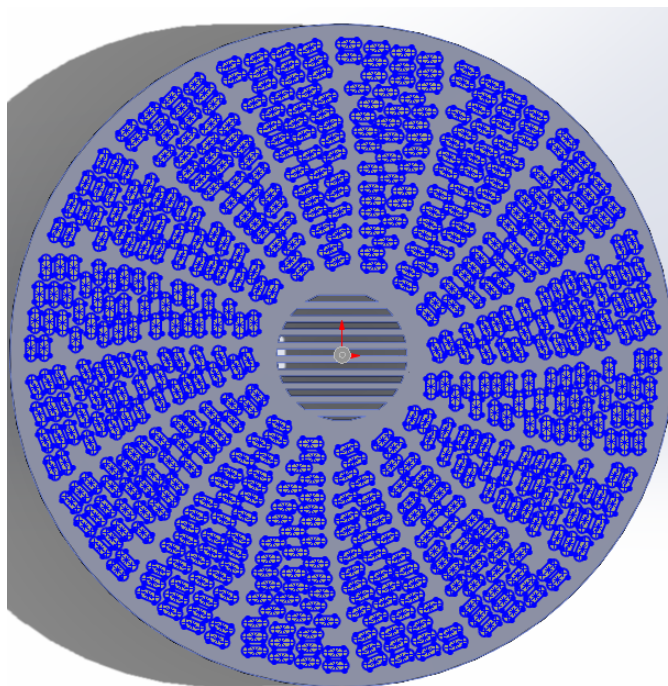


Рисунок 6.5 – операція «Circular Sketch Pattern»

Збірка(корпус, решітка та цапфа)

Загальний вид збірка Рисунок 6.6

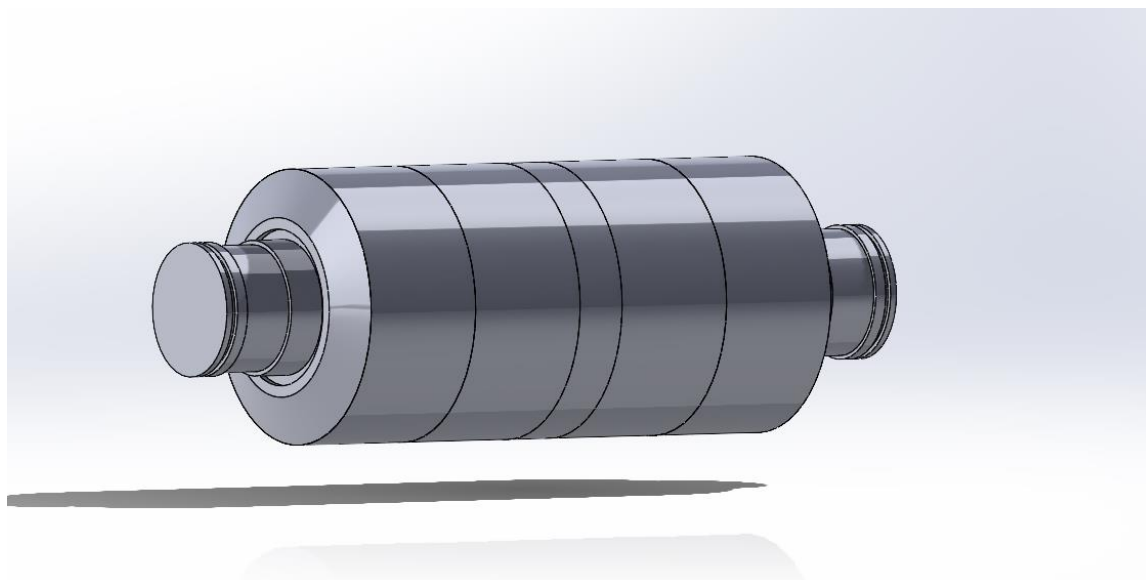


Рисунок 6.6 – Загальний вид

Загальний вид збірка в розрізі Рисунок 6.7

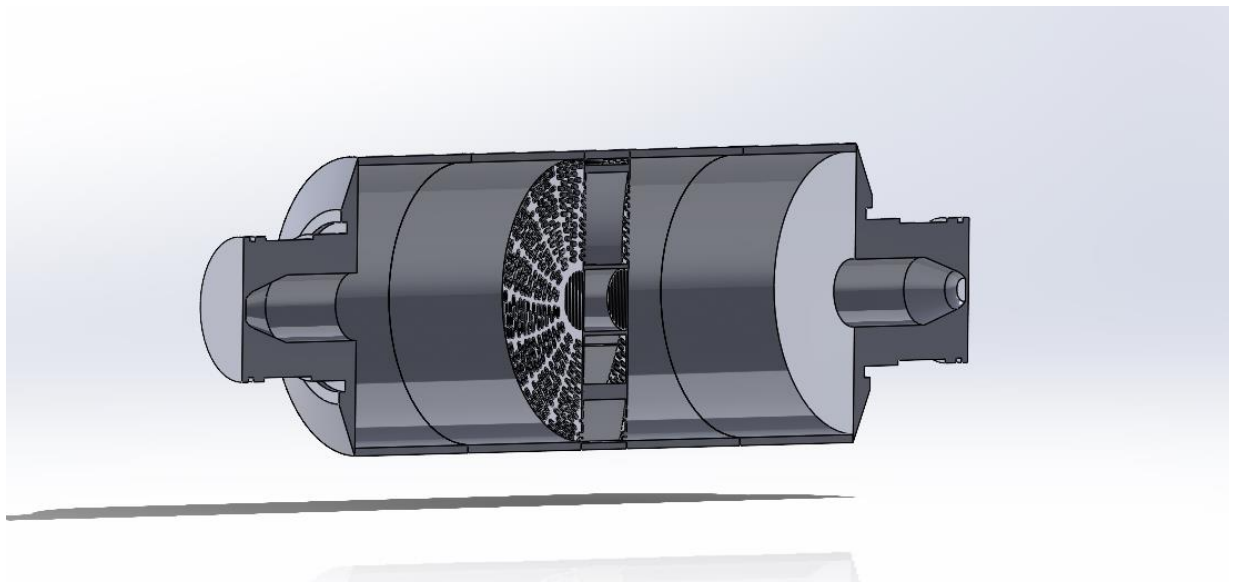


Рисунок-6.7 розріз

6.2 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАРАБАНУ МЛИНА

Числове моделювання базової конструкції

Для виконання необхідних розрахунків нашої 3D-моделі базової деталі використовуємо програмне забезпечення ANSYS 2022

Для початку нам потрібно обрати необхідні модулі. В нашому випадку це будуть Static Structural (Рисунок 6.8).

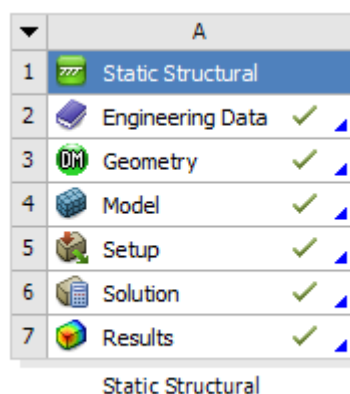


Рисунок 6.8 – Середовище виконання розрахунків

Перед початком розрахунку необхідно задати характеристики матеріалу

конструкції (Рисунок 6.9). Оскільки вузол виготовлено зі сталі 40X [7], встановлюємо значення межі текучості $\sigma_t = 785$ Мпа у полях Tensile Yield Strength та Compressive Yield Strength. Аналогічно вносимо значення межі міцності $\sigma_b = 980$ Мпа у відповідні колонки для розтягу та стиску (Tensile/Compressive Ultimate Strength)

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data				Description
2	Material				
3	Structural Steel			Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C^-1		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
8	Young's Modulus	2,1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
13	Display Curve Type	Strain-Life			
14	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa		
15	Strength Exponent	-0,106			
16	Ductility Coefficient	0,213			
17	Ductility Exponent	-0,47			
18	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2			
20	S-N Curve	Tabular			
21	Interpolation	Log-Log			
22	Scale	1			
23	Offset	0	Pa		
24	Tensile Yield Strength	7,85E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	9,8E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Рисунок 6.9 – Середовище задання характеристик матеріалу конструкції

Модель у форматі **STEP 203** завантажується у розділ «Geometry». На корпусі циліндра виконуються один конструкційні розрізи, що необхідно для точного позиціонування навантажувальних зон (Рисунок 6.9).

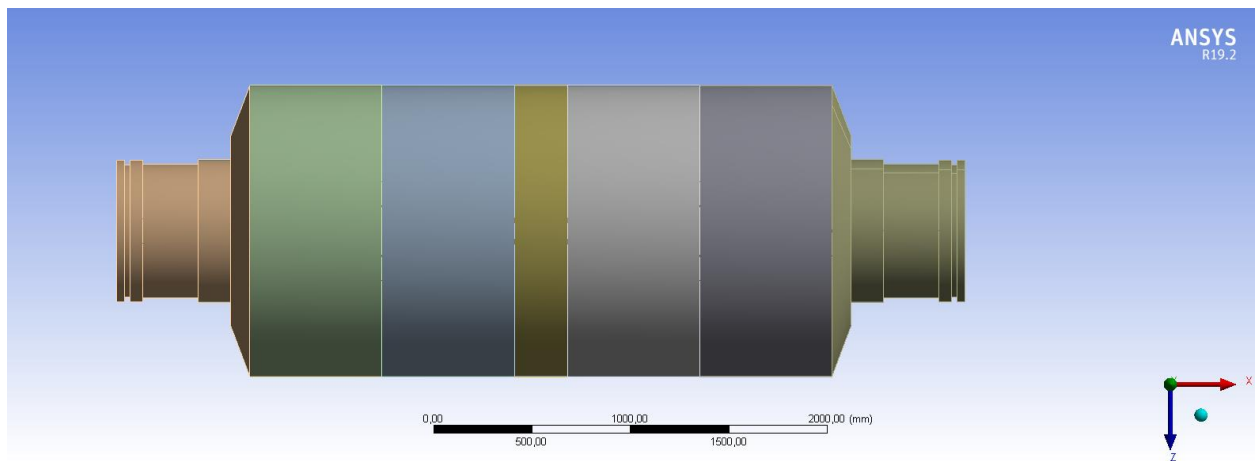


Рисунок 6.9-розрізана модель

Для забезпечення коректної передачі зусиль та теплових потоків між частинами деталі проводиться операція об'єднання геометрії. Генерація сітки виконується у модулі «**Mesh**» із заданням глобального розміру елемента (**Element Size**) рівним **10 мм**. Це забезпечує необхідну щільність розбиття для отримання збіжних результатів при раціональному використанні обчислювальних ресурсів.

Етап встановлення граничних умов візуалізовано на рисунку 6.10

А: Навантаження (граничні умови для внутрішньої та зовнішньої поверхні):

Ділянка А :Команда «Line Pressure» - 73.48 N/mm .

Ділянка В :Команда «Standard Earth Gravity» для імітування сили тяжіння.

Ділянка С,D :Команда «Cylindrical Support» для імітування закріплення з усіх сторін.

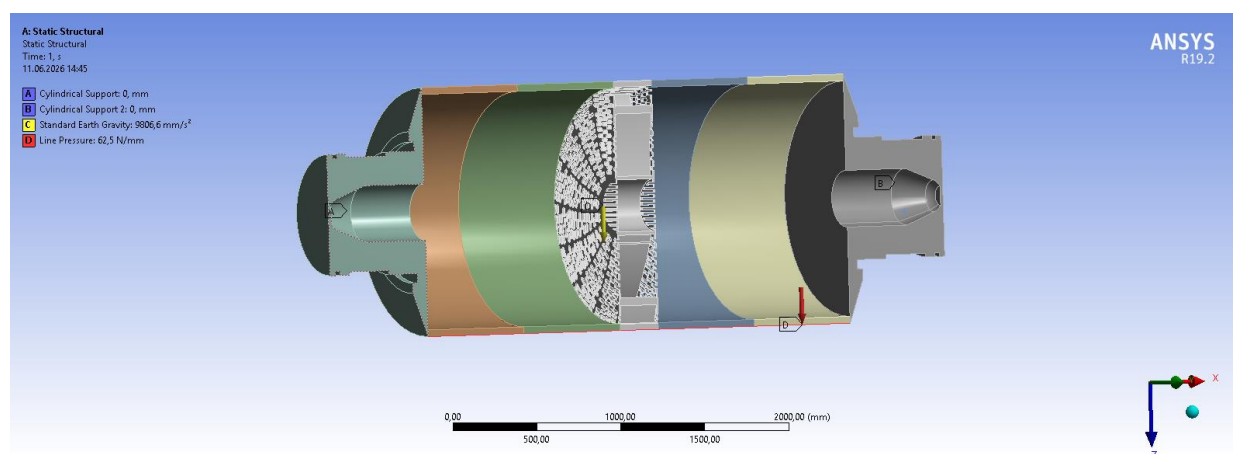


Рисунок 6.10-Розташовані навантаження та закріплення

Маючи данні з курсового проєкту , розраховуємо силу на одиницю довжини, тобто лінійне навантаження (Н/мм).

$$F = mg = 44090 * 9.81 = 432523 \text{ H}$$

Знайдено силу яка діє на барабан , тепер знаходимо значення яке діє на всю довжину (Н/мм).

$$q = \frac{F}{L} = \frac{432523}{5886} = 73.48 \text{ H/мм}$$

L-5886 мм , довжина барабана.

6.3 Результати числових розрахунків базової моделі

Після завершення розрахунків ми отримали наступні дані:

Static Structural: Аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити напружено-деформований стан корпусу за критерієм еквівалентних напружень (за Мізесом) та сумарними деформаціями. Додатково проведено розрахунок коефіцієнта запасу міцності, значення якого підтверджує конструкційну надійність вузла з урахуванням фізико-механічних властивостей сталі 40X[6] у пружній зоні деформування.

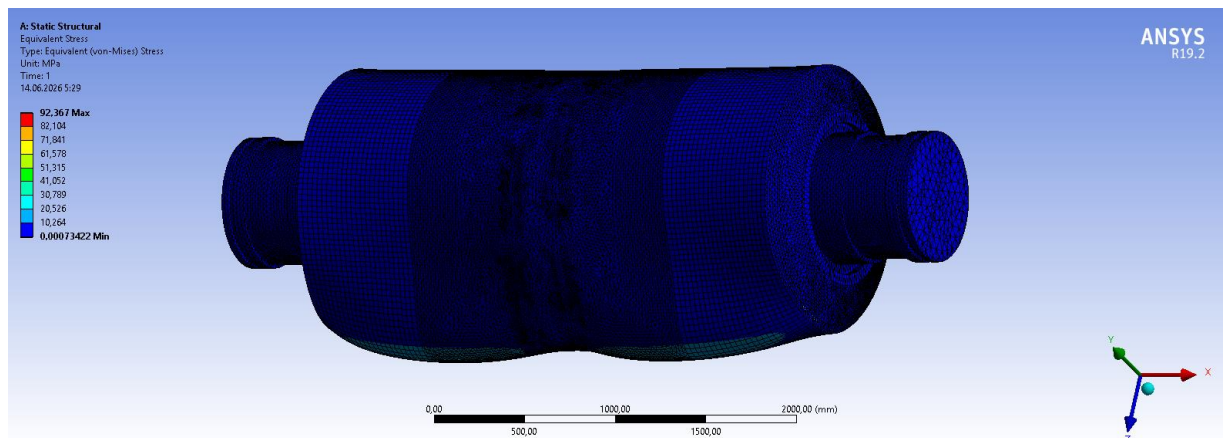


Рисунок 6.11-Еквівалентні напруження в розрізі

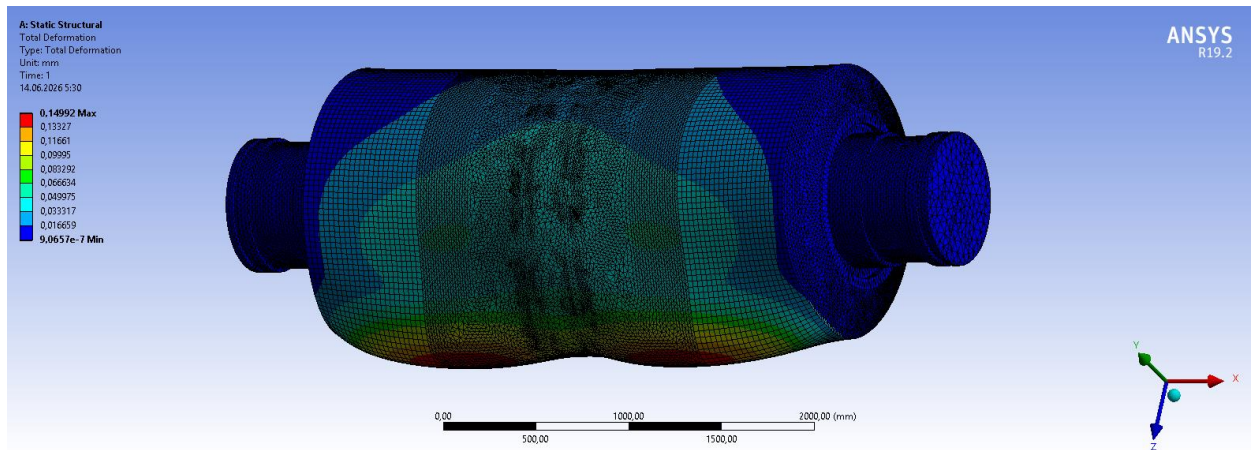


Рисунок 6.12-тотальні деформації в розрізі

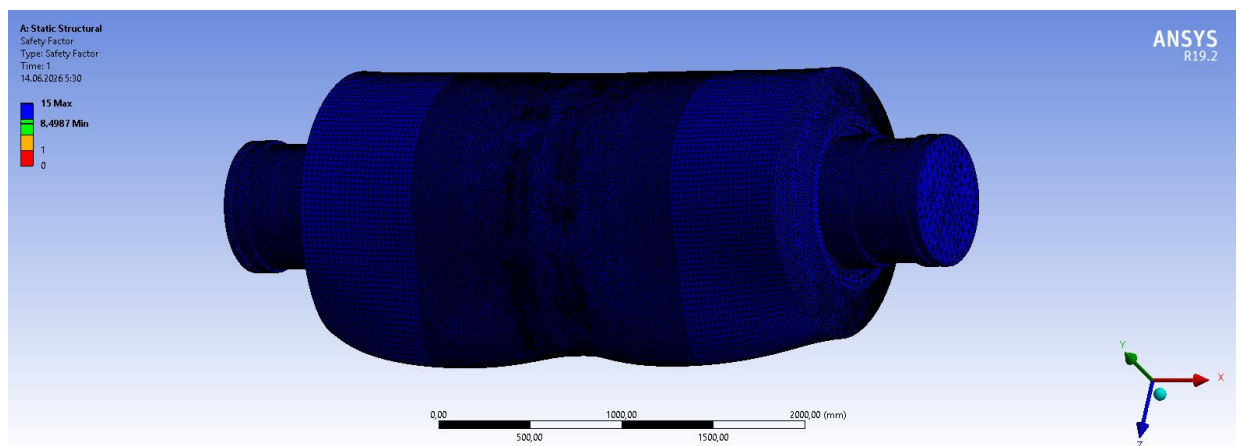


Рисунок 6.13-Коефіцієнт запасу міцності в розрізі

Аналіз міцності трубного млина

За результатами розрахунку в системі ANSYS, максимальні еквівалентні напруження в корпусі становлять $\sigma_{\text{екв}} = 92,367$ МПа, а найбільші деформації $s = 0.14992$ мм. Отримане значення є значно нижчим за межу текучості сталі 40Х (785 МПа), що свідчить про високу надійність конструкції.

Коефіцієнт запасу міцності конструкції:

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{785}{92,367} = 8,49$$

Основними зонами концентрації напружень є:

У зонах скупчення матеріалу.

6.4 Числове моделювання модернізованої конструкції

Для виконання необхідних розрахунків нашої 3D-моделі базової деталі використовуємо програмне забезпечення ANSYS 2022

Для початку нам потрібно обрати необхідні модулі. В нашому випадку це будуть Static Structural (Рис. 6.14).

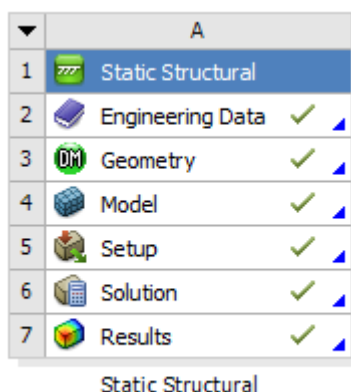


Рисунок 6.14 – Середовище виконання розрахунків

Перед початком розрахунку необхідно задати характеристики матеріалу конструкції (Рис. 6.15). Оскільки вузол виготовлено зі сталі 40X [7], встановлюємо значення межі текучості $\sigma_t = 785$ МПа у полях Tensile Yield Strength та Compressive Yield Strength. Аналогічно вносимо значення межі міцності $\sigma_b = 980$ МПа у відповідні колонки для розтягу та стиску (Tensile/Compressive Ultimate Strength)

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: Structural Steel							
	A	B	C	D	E		
1	Property	Value	Unit				
2	Material Field Variables	Table					
3	Density	7850	kg m^-3				
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion						
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C^-1				
6	Isotropic Elasticity						
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...					
8	Young's Modulus	2,1E+11	Pa				
9	Poisson's Ratio	0,3					
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa				
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa				
12	Strain-Life Parameters						
13	Display Curve Type	Strain-Life					
14	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa				
15	Strength Exponent	-0,106					
16	Ductility Coefficient	0,213					
17	Ductility Exponent	-0,47					
18	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa				
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2					
20	S-N Curve	Tabular					
21	Interpolation	Log-Log					
22	Scale	1					
23	Offset	0	Pa				
24	Tensile Yield Strength	7,85E+08	Pa				
25	Compressive Yield Strength	9,8E+08	Pa				
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa				
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa				

Рисунок 6.15 – Середовище задання характеристик матеріалу конструкції

Модель у форматі **STEP 203** завантажується у розділ «**Geometry**». На корпусі циліндра виконуються один конструкційні розрізи, що необхідно для точного позиціонування навантажувальних зон (Рис. 6.16).

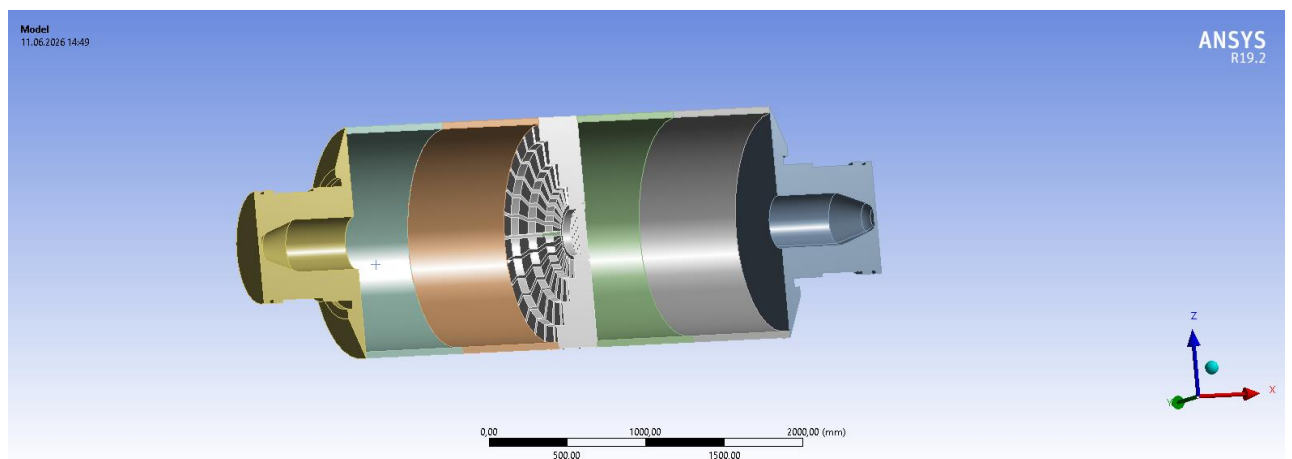


Рисунок 6.16-Розрізана модель

Для забезпечення коректної передачі зусиль та теплових потоків між частинами деталі проводиться операція об'єднання геометрії. Генерація сітки

виконується у модулі «**Mesh**» із заданням глобального розміру елемента (**Element Size**) рівним **10 мм**. Це забезпечує необхідну щільність розбиття для отримання збіжних результатів при раціональному використанні обчислювальних ресурсів.

Етап встановлення граничних умов візуалізовано на рисунку 6.17.

А: Навантаження (граничні умови для внутрішньої та зовнішньої поверхні):

Ділянка А :Команда «Line Pressure» - 73.48 N/mm .

Ділянка В :Команда «Standard Earth Gravity» для імітування сили тяжіння.

Ділянка С, D :Команда «Cylindrical Support» для імітування закріплення з усіх сторін.

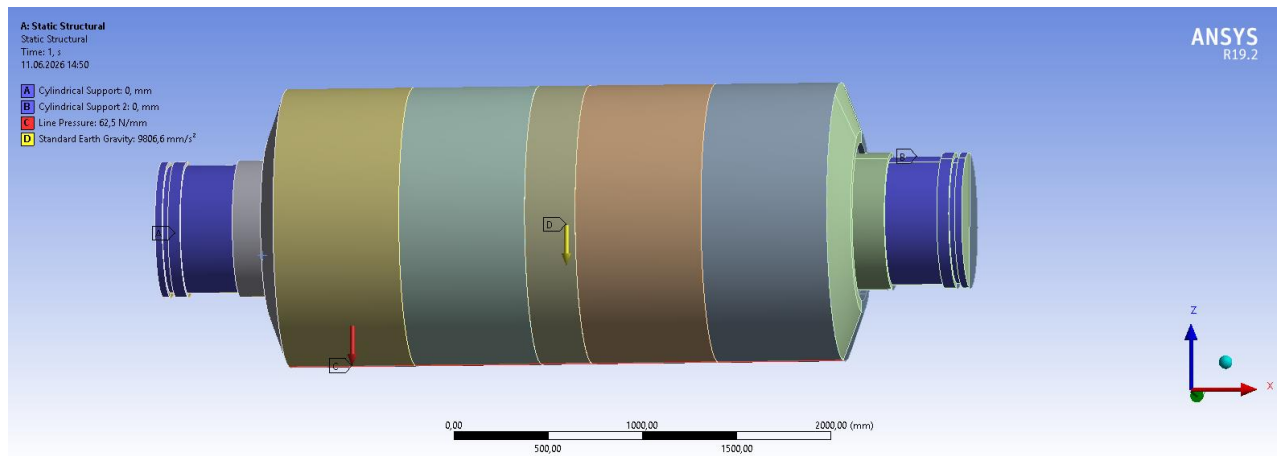


Рисунок 6.17-Розташовані навантаження та закріплення

Маючи данні з курсового проекту , розраховуємо силу на одиницю довжини, т тобто лінійне навантаження (Н/мм).

$$F = mg = 44090 * 9.81 = 432523 \text{ H}$$

Знайдено силу яка діє на барабан , тепер знаходимо значення яке діє на всю довжину (Н/мм).

$$q = \frac{F}{L} = \frac{432523}{5886} = 73.48 \text{ H/мм}$$

L-5886 мм , довжина барабана.

6.5 Результати числових розрахунків модернізованої моделі

Після завершення розрахунків ми отримали наступні дані:

Static Structural: Аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити напружено-деформований стан корпусу за критерієм еквівалентних напружень (за Мізесом) та сумарними деформаціями. Додатково проведено розрахунок коефіцієнта запасу міцності, значення якого підтверджує конструкційну надійність вузла з урахуванням фізико-механічних властивостей сталі 40X[6] у пружній зоні деформування.

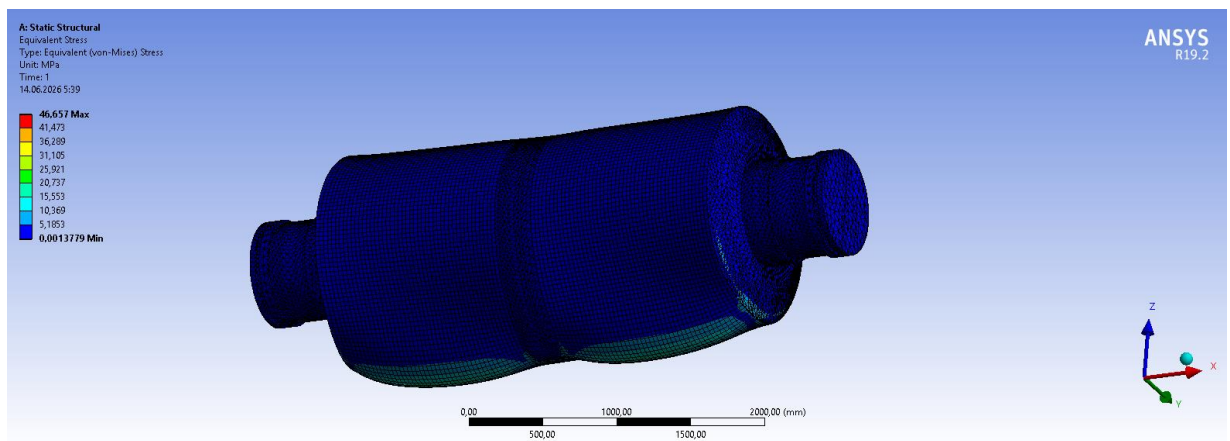


Рисунок 6.18-Еквівалентні напруження в розрізі

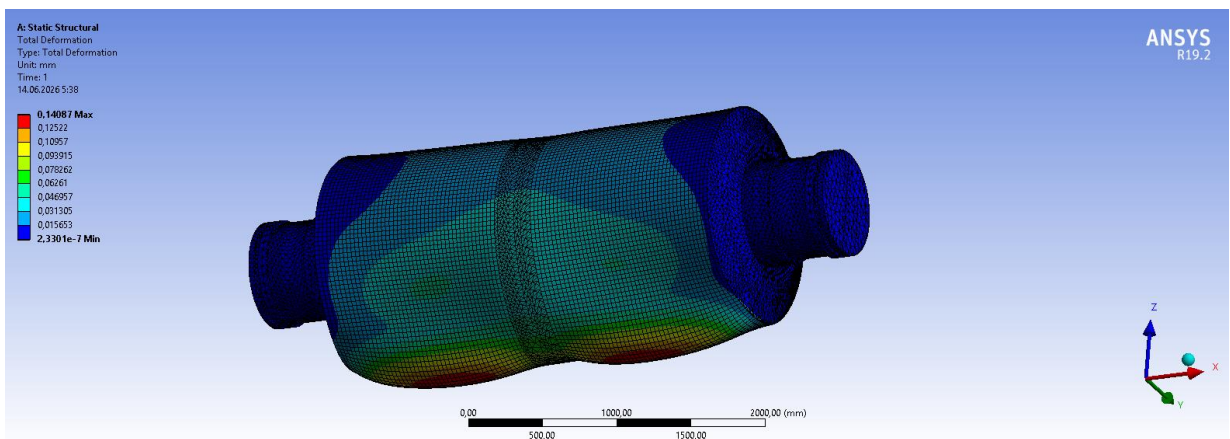


Рисунок 6.19-тотальні деформації в розрізі

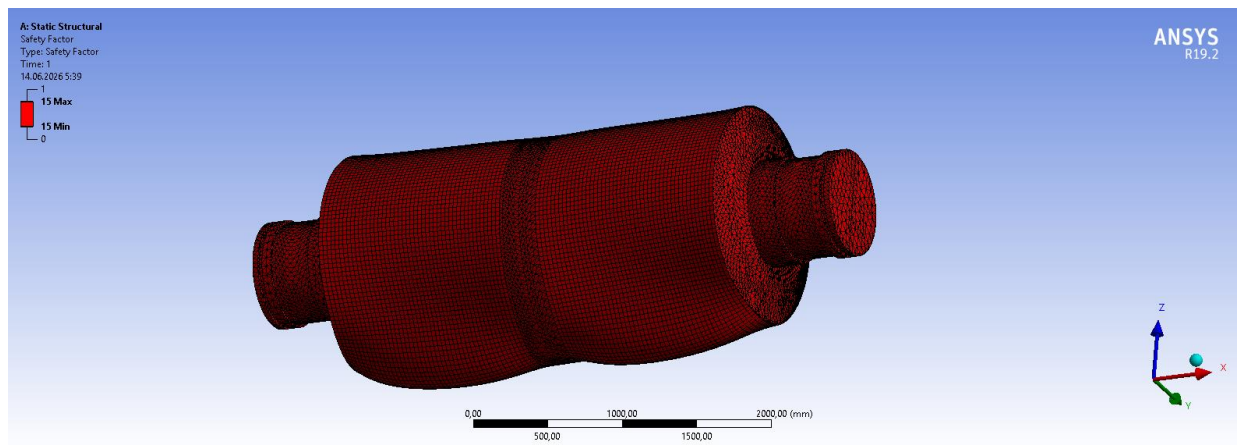


Рисунок 6.20-Коефіцієнт запасу міцності в розрізі

Аналіз міцності трубного млина

За результатами розрахунку в системі ANSYS, максимальні еквівалентні напруження в корпусі становлять $\sigma_{\text{екв}} = 46.657$ МПа, а найбільші деформації $s = 0,14087$ мм. Отримане значення є значно нижчим за межу текучості сталі 40Х (785 МПа), що свідчить про високу надійність конструкції.

Коефіцієнт запасу міцності конструкції:

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{785}{46,567} = 16,82$$

Основними зонами концентрації напружень є:

У зонах скупчення матеріалу.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

7.1 Правові основи та організаційно-технічна характеристика об'єкта дослідження

Забезпечення безпечних умов праці на підприємствах будівельної індустрії, зокрема на цементних заводах, є обов'язковою складовою сталого виробничого процесу. Нормативно-правову базу в цій сфері формують Конституція України, Кодекс законів про працю України та Закон України «Про охорону праці». Головна мета системи управління охороною праці (СУОП) — недопущення виробничого травматизму та мінімізація впливу шкідливих чинників на здоров'я операторів.

Об'єктом аналізу в цьому розділі є дільниця тонкого помелу клінкеру цементного заводу, де функціонує модернізований трубний млин із замкненим циклом помелу та сепарацією. Загальна площа цехових виробничих потужностей становить близько 4200 м², а чисельність персоналу перевищує 80 осіб. Підприємство реалізує повний технологічний цикл: від приймання клінкеру, гіпсу та мінеральних добавок до відвантаження готового портландцементу.

Вузол трубного млина є центральним агрегатом цеху помелу. Оцінку ризиків та нормування небезпечних факторів проведено безпосередньо для робочої зони навколо млина, де специфіка подрібнення матеріалу у сталевому барабані з мелючими тілами формує відповідний профіль небезпек. Класифікацію шкідливих та небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) при роботі модернізованого агрегату наведено у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 — Класифікація шкідливих та небезпечних виробничих факторів на дільниці помелу цементу

Найменування виробничого фактора	Джерело виникнення та потенційна загроза	Чинний нормативний документ
Запиленість повітря (пил цементу, клінкеру, гіпсу)	Помел клінкеру у трубному млині, завантаження та вивантаження матеріалів; ризик пневмоконіозу при вдиханні дрібнодисперсного пилу.	Наказ МОЗ України № 1596 від 14.07.2020; ДСТУ EN 482:2022
Підвищений рівень шуму та вібрації	Обертання барабана трубного млина, удари куль та циліндрів об футеровку, робота сепараторів та вентиляторів.	ДСН 3.3.6.037-99; ДСН 3.3.6.039-99
Несприятливі мікрокліматичні умови	Теплове випромінювання від корпусу млина та клінкерохолодника; температура поверхні млина може сягати 70–80 °С.	ДСН 3.3.6.042-99
Ураження електричним струмом	Живлення приводного двигуна млина напругою 6 кВ; небезпека торкання струмопровідних частин при обслуговуванні.	ДСТУ Б В.2.5-82:2016; ПУЕ

Ризик виникнення пожежі та вибуху	Наявність тонкодисперсного цементного та вугільного пилу з нижньою концентраційною межею займання; мастила редукторів.	ДБН В.1.1-7:2016; ДСТУ Б В.1.1-36:2016; НАПБ А.01.001-2014
Недостатній рівень освітленості	Складність контролю технічного стану внутрішніх секцій млина та якості помелу за недостатнього освітлення.	ДБН В.2.5-28:2018

7.2 Санітарно-гігієнічний аналіз запиленості та мікроклімату

Обслуговування трубного млина за характером фізичного навантаження відноситься до робіт середньої важкості категорії Пб (енерговитрати 201–250 ккал/год). Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, оптимальна температура повітря для цієї категорії у теплий період має становити 17–19 °С (допустима до 27 °С), а відносна вологість — 40–60 %.

Головний санітарно-гігієнічний ризик виробництва цементу пов'язаний із виділенням тонкодисперсного пилу клінкеру (медіанний діаметр частинок 5–30 мкм) та активного мінерального наповнювача. Гранично допустима концентрація (ГДК) цементного пилу в повітрі робочої зони відповідно до Наказу МОЗ України № 1596 становить 6 мг/м³ (при вмісті вільного SiO₂ менше 2 %). Перевищення цього показника призводить до розвитку пневмоконіозу та хронічних бронхітів.

Джерелами пилоутворення є завантажувальна воронка першої камери, розвантажувальна горловина барабана, пневмотранспортна лінія та вузол сепаратора. Для локалізації пилових потоків безпосередньо в місцях утворення передбачено аспіраційні укриття з від'ємними вирвами. Загальний розрахунковий об'єм аспіраційного повітря для двостадійної схеми очищення становить $L = 18$

000 м³/год. Очищення здійснюється у рукавному фільтрі типу ФРОС із коефіцієнтом очищення не менше 99,5 %, що забезпечує залишкову концентрацію пилу на виході не вище 20 мг/м³ і цілковите дотримання норм ДСТУ EN 482:2022.

7.3 Виробнича акустика та захист від вібрації

Трубний млин є найпотужнішим джерелом шуму та вібрації у цементному цеху. Основні збудники коливань — удари сталевих куль та цильпесів об броньові плити футеровки, обертання барабана масою понад 100 т на підшипниках великого діаметра, а також робота центрального вентилятора аспіраційної системи. Вимірювання свідчать, що фактичний рівень звукового тиску на робочому місці машиніста млина без засобів захисту досягає 94–96 дБА, що суттєво перевищує норму 80 дБА за ДСН 3.3.6.037-99.

У рамках модернізації трубного млина реалізовано наступний комплекс технічних та організаційних рішень для зниження акустичного впливу:

- **Звукоізолювальне укріття барабана:** Корпус млина по зовнішній поверхні обшито знімними панелями з вібродемпфувального матеріалу на основі бутилкаучуку завтовшки 8 мм; між панелями та корпусом передбачено прошарок мінераловатного звукопоглинача (50 мм) з коефіцієнтом звукопоглинання $\alpha \geq 0,8$.
- **Пружна фундаментна ізоляція:** Підшипникові опори млина та фундаментна плита роздільні — між ними встановлено комплект плоских гумово-металевих віброізоляторів типу ВСК-300, розрахованих на статичне навантаження до 500 кН кожен, що відповідає вимогам ДСН 3.3.6.039-99.
- **Засоби індивідуального захисту:** При проведенні ремонтних робіт усередині барабана та при плановому огляді бронефутеровки персонал використовує навушники з рівнем шумозниження $\text{SNR} \geq 28$ дБ відповідно до ДСТУ EN 352-1:2018.

Застосування зазначених заходів забезпечує зниження шуму на стаціонарних робочих місцях до 76–78 дБА — в межах санітарної норми.

7.4 Електробезпека на дільниці помелу

Трубний млин оснащений приводним синхронним двигуном потужністю 2500 кВт, що живиться від мережі 6 кВ. Наявність напруги вище 1000 В автоматично відносить приміщення цеху за класифікацією ПУЕ до категорії особливо небезпечних, оскільки одночасно присутні: струмопровідна підлога (бетон із металевою арматурою), значні металеві маси обладнання, підвищена запиленість та можливість зволоження при роботі аспіраційної системи.

Комплекс засобів електрозахисту, реалізованих відповідно до ДСТУ Б В.2.5-82:2016, включає:

- **Захисне заземлення та занулення:** Усі металоконструкції млина, редуктор, корпус сепаратора і шафи керування з'єднані із заводським контуром заземлення. Опір контуру, виміряний після монтажу, становить не більше 4 Ом.
- **Реле захисту від витоку струму:** Вводні й секційні вимикачі розподільного пристрою 6 кВ оснащені мікропроцесорними захистами з функцією контролю ізоляції; для кіл живлення допоміжного обладнання (0,4 кВ) встановлені диференційні ПЗВ із порогом спрацювання 30 мА та часом відключення не більше 0,04 с.
- **Блокування технічного обслуговування:** Система блокувань виключає можливість відкривання кришок люків барабана та введення персоналу всередину без видимого розриву ланцюга живлення та механічного гальмування барабана (процедура LOTO — Lockout/Tagout).
- **Усунення статичної електрики:** Пневмотранспортні трубопроводи та вузли сепаратора заземлені через кабельні перемички, що перешкоджає накопиченню заряду на цементному пилу та виключає іскровий розряд як потенційне джерело займання.

7.5 Пожежна та вибухова безпека

Тонкодисперсний цементний пил сам по собі не є горючим, однак у реальному виробництві разом із ним у системі аспірації та сепарації може циркулювати вугільний пил із добавок або пил органічних ПАР. Нижня

концентраційна межа займання (НКМЗ) для вугільного пилю складає 35–45 г/м³. Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 та НАПБ А.01.001-2014, приміщення цеху помелу за вибухопожежною небезпекою класифікується як категорія Б (вибухонебезпечна).

Будівля цеху загальною площею 4200 м² зведена з бетонних конструкцій і має I ступінь вогнестійкості за ДБН В.1.1-7:2016. Засоби протипожежного та вибухового захисту включають:

- **Автоматична система пожежо-вибухозахисту:** Приміщення обладнано комбінованими димовими та тепловими сповіщувачами (серія ДСТУ EN 54), а також датчиками концентрації горючого пилю на базі оптичних сенсорів. При перевищенні 20 % від НКМЗ система автоматично активує аварійний скид тиску через вибухові клапани на даху.
- **Первинні засоби пожежогасіння:** Вздовж лінії обслуговування млина розміщені порошкові вогнегасники ОП-10 та вуглекислотні ВВ-8. Внутрішня пожежна мережа забезпечена кранами DN 65 із рукавами довжиною 20 м.
- **Евакуаційні маршрути:** Для 80 осіб штату передбачено два незалежних евакуаційних виходи шириною не менше 1,5 м кожен; шляхи евакуації позначені фотолюмінесцентними знаками згідно з ДСТУ EN ISO 7010:2019.

7.6 Проектування виробничого освітлення

Надійна робота трубного млина в замкнутому циклі з сепаратором потребує ретельного візуального контролю стану захисних огорожень, рівня завантаження бункерів та якості готового продукту. Для цього розроблено суміщену систему освітлення: природне (верхнє через зенітні ліхтарі) та штучне загальне з виділеним місцевим у точках огляду.

Розрахунок штучного освітлення виконано відповідно до ДБН В.2.5-28:2018. Роботи на дільниці помелу відносяться до IV розряду зорової роботи, що вимагає мінімальної освітленості 200 лк при загальному освітленні та 300 лк у

зонах контролю (манометри, прилади, датчики). Для підвищених зон (відмітки +6,0 та +12,0 м) застосовані підвісні LED-прожектори зі ступенем захисту IP66 (захист від пилу та струменя води) потужністю 200 Вт і світловим потоком 24 000 лм, коефіцієнт передачі кольору $R_a > 80$.

7.7 Охорона навколишнього середовища

Відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», виробництво цементу належить до екологічно навантажених галузей передусім через значні пилові викиди та споживання природних ресурсів. Модернізація кульового млина спрямована, зокрема, на підвищення енергоефективності процесу помелу, що дозволяє зменшити питоме споживання електроенергії на одиницю готової продукції та відповідно знизити вуглецевий слід виробництва.

Основні екологічні заходи проєкту:

- **Вловлювання та рециклінг пилу:** Пил, уловлений у рукавному фільтрі аспіраційної системи, повністю повертається у технологічний процес за допомогою гвинтового конвеєра. Це виключає твердий відхід та дозволяє щорічно повертати у виробництво до 3000 т матеріалу.
- **Замкнений водообіг для зрошення:** Система водяного охолодження підшипників млина та зрошення завантажувального вузла організована за замкненим контуром із охолоджувачем та відстійником завислих часток. Скидання промислових стічних вод у міську каналізацію виключено.
- **Контроль атмосферних викидів:** Після рукавного фільтра встановлено автоматичний пиловимірювач безперервної дії на базі ДСТУ ISO 9096:2007, дані якого виводяться на центральний диспетчерський пункт і архівуються відповідно до вимог Закону України «Про охорону атмосферного повітря».

Висновок до розділу:

Проведено комплексний аналіз умов праці та виробничої безпеки на ділянці помелу клінкеру цементного заводу із загальною площею цехових

потужностей близько 4200 м² та чисельністю персоналу понад 80 осіб.

— **Ідентифіковано основні джерела небезпечних та шкідливих факторів:** запыленість робочої зони тонкодисперсним цементним пилом (ГДК — 6 мг/м³), підвищений рівень шуму від барабана млина (до 96 дБА), теплове навантаження від корпусу агрегату, а також ризики ураження струмом при обслуговуванні привода напругою 6 кВ та вибухонебезпека пилоповітряних сумішей (категорія приміщення Б).

— **Запропоновано та технічно обґрунтовано інженерні заходи нейтралізації небезпек:** розраховано продуктивність системи аспірації ($L = 18\,000\text{ м}^3/\text{год}$) з рукавним фільтром, впроваджено звукоізолювальний кожух та пружні віброізолятори, спроектовано контур захисного заземлення ($R_z \leq 4\text{ Ом}$), встановлено автоматичні сповіщувачі вибухонебезпечного пилу відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.5-82:2016 та ДБН В.2.5-28:2018.

— **Впроваджені рішення з рециклінгу вловленого пилу та організації замкнутого водообігу** для зрошення подрібненого матеріалу забезпечують відповідність виробничого комплексу екологічним вимогам Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища»

8 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

Вал є важливою деталлю привода трубного млина. Він призначений для передачі крутного моменту від редуктора до барабана млина, забезпечуючи стабільне обертання та функціонування всієї машини під навантаженням. Деталь має масивну форму з центральною шийкою діаметром $\varnothing 400$ мм, двома великими кінцевими фланцями діаметром $\varnothing 750$ мм (з маточинами діаметрами $\varnothing 450$ мм та $\varnothing 500$ мм) та плавними конусними переходами під кутом 117° . На кожному з фланців виконано по 8 рівномірно розташованих наскрізних отворів $\varnothing 50$ мм по відповідних ділильному колу $\varnothing 600$ мм для надійного болтового кріплення до суміжних елементів приводного механізму млина.

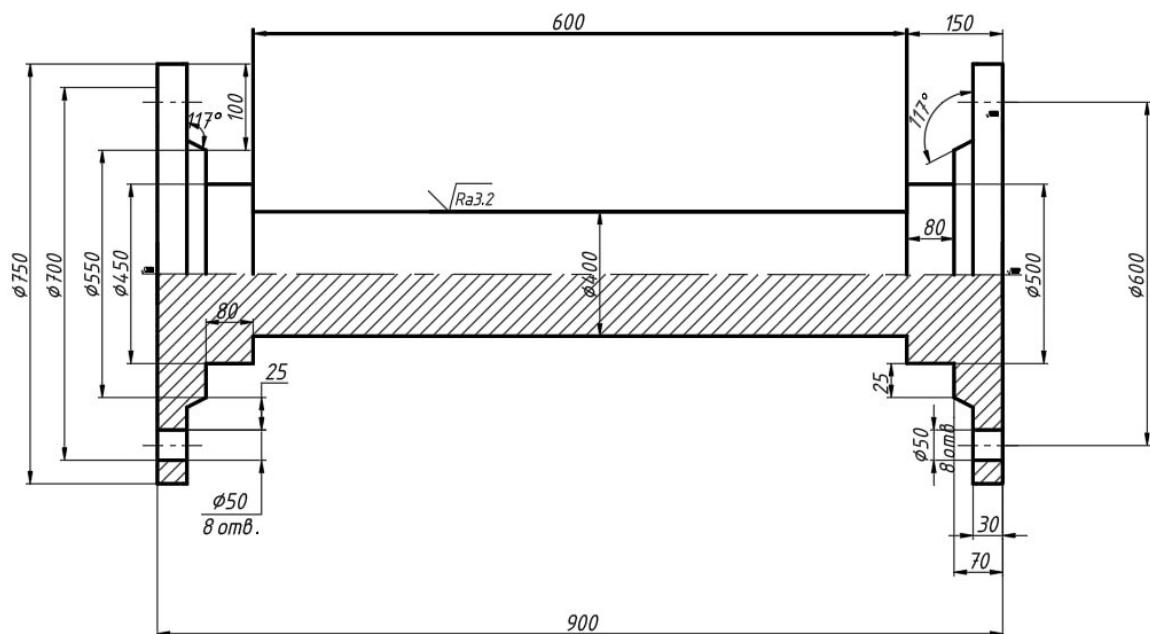


Рисунок 8.1 – Ескіз валу

Матеріал деталі – сталь 45 за ДСТУ 7809:2015. Цей матеріал ідеально підходить для виготовлення високонавантажених деталей привода важкого промислового обладнання, оскільки це якісна конструкційна вуглецева сталь, що має високу міцність і витримує значні механічні, циклічні та динамічні навантаження на згин і кручення, які постійно виникають під час інтенсивної роботи приводного вузла трубного млина.

Як заготовку для виготовлення такого великогабаритного вала доцільно прийняти суцільну ковану заготовку з максимальним зовнішнім діаметром (більше 750 мм) і загальною довжиною (більше 900 мм). Така заготовка забезпечує необхідні оптимальні припуски на чорнову та чистову токарну обробку зовнішніх циліндричних поверхонь фланців, маточин та центральної шийки, а також припуски по довжині для підрізання торців до остаточного лінійного розміру 900 мм. Структура заготовки гарантує високу щільність металу, що критично для деталей важкого машинобудування.

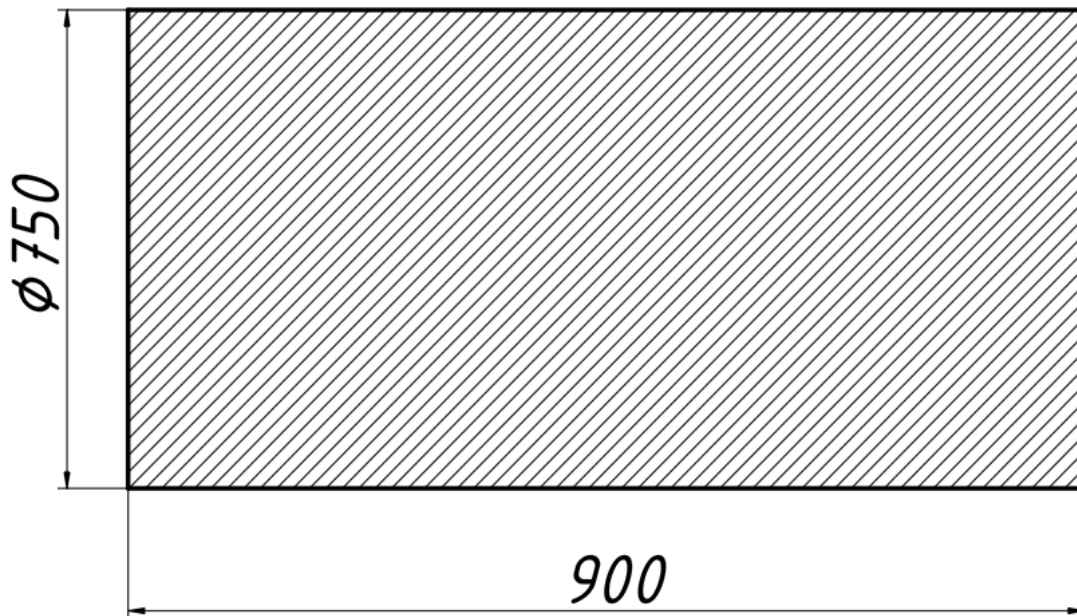


Рисунок 8.2 – Заготовка валу

Технологічний процес виготовлення вала складається з кількох токарних операцій та радіально-свердлильної операції. Основна обробка виконується методами лезового різання: підрізанням великих торців, обточуванням ступінчастих циліндричних поверхонь, конусним точінням та свердлінням отворів великого діаметра.

Зважаючи на великі габарити та масу виробу, спочатку на важкому токарному верстаті з ЧПК ST-50, виконують чорнову обробку з першого установу: підрізають лівий торець, начорно обточують лівий фланець Ø750, його маточину

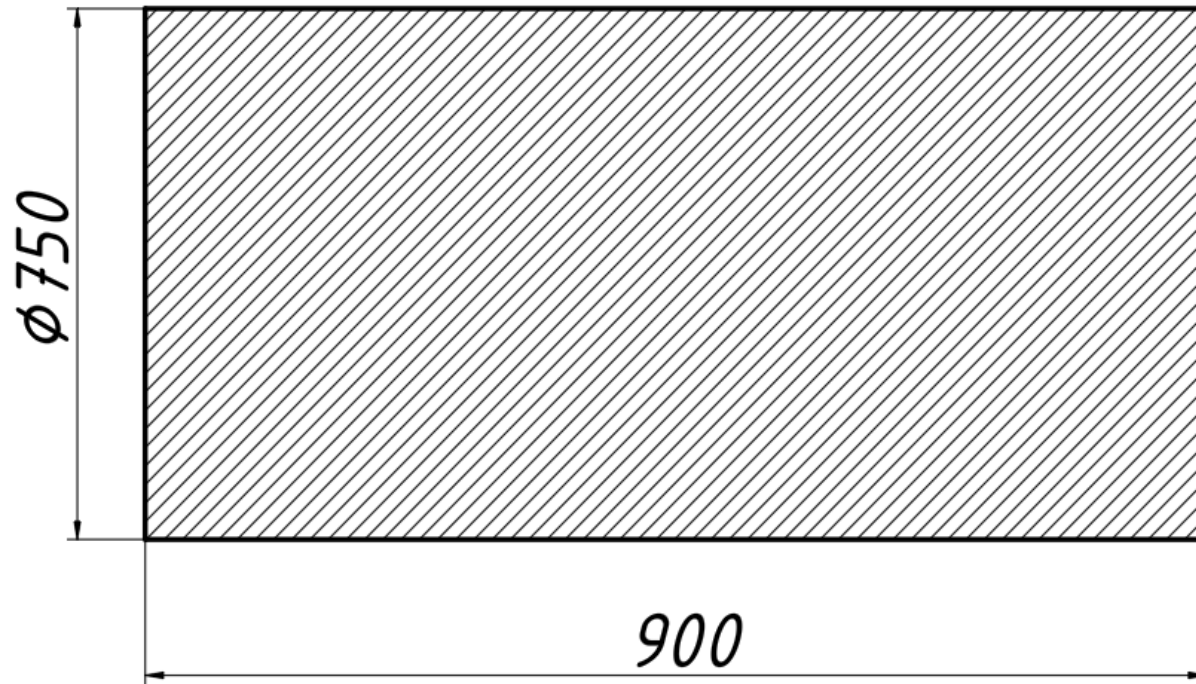
Ø450 та частину центральної шийки Ø400. Далі деталь перевстановлюють на цьому ж верстаті для виконання чистової обробки та остаточного профілювання: підрізають правий торець в остаточну довжину 900 мм, начисто обточують правий фланець Ø750, маточину Ø500, центральну шийку Ø400, точно формують конусні переходи під кутом 117° з обох боків та знімають технологічні фаски. На фінальному етапі деталь транспортують на потужний радіально-свердлильний верстат 2М57, де за координатною розміткою послідовно свердлять 8 наскрізних кріпильних отворів Ø50 мм на лівому фланці та 8 отворів Ø50 мм на правому фланці.

Детально технологічний процес виготовлення фланця наведено у маршрутній (МК), операційних (ОК) та картах ескізів (КЕ)

4

Дубл.										
Взамін.										
Підпис							Зм	Ар	№ док.	Підпис

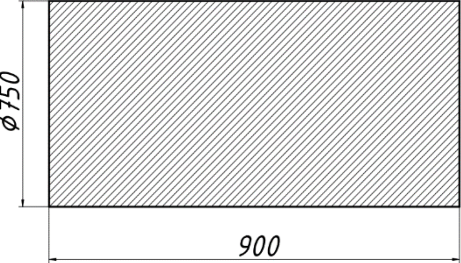
Розробив	Панченко О.В.			КПІ ім.Ігоря Сікорського						005		
Перевірів	Борщук С.О.											
					ВАЛ					Н		
Н. контр.												



КЕ	Токарно-гвинторізна									
----	---------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Technical drawing of a shaft-hub assembly in cross-section. The shaft has a diameter of $\phi 750$ and a length of 900. It is mounted on a hub with an inner bore diameter of $\phi 450$ and a total thickness of 100. The shaft is secured with a pin on each end.

Токарна з ЧПК

Дубл.													
Взамін.													
Підпис													
										Зм	Ар	Недок.	Підпис
Розробив	Панченко О.В.					КПІ ім.Ігоря Сікорського							
Перевірів	Борщук С.О.												
						ВАЛ				Н		005	
Н. контр.													
					Назва операції				Матеріал				
					Токарна				Сталь 45 ДСТУ 7809:2015				
					Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ		Коод	
						кг						1	
					Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми				
					Токарний верстат з ЧПК Haas ST-50								
					То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР				
									Емульсія				
Р					ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v	
P01	1. Підрізати лівий торець начорно.												
T02	2. Обточити зовнішню циліндричну поверхню лівого фланця Ø750 начорно.												
O03	3. Обточити поверхню маточини лівого фланця Ø450, довжина 100 мм, начорно.												
O04	4. Обточити центральну шийку вала Ø400 начорно на максимально доступну довжину.												
T05													
T06													
P07													
OK	Обробка різанням												

Дубл.														
Взамін.														
Підпис										Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

Розробив	Панченко О.В.			НТУУ "КПІ", ФАПІЄ										
Перевірів	Борщик С.О.													
Н. контр.				ВАЛ								Н		010

Назва операції				Матеріал			
Токарна				Сталь 45 ДСТУ 7809:2015			
Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ		Коод
	кг						1
Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми			
Токарний верстат з ЧПК Haas ST-50							
То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР			
				Емульсія			

P		ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1.Підрізати правий торець в остаточний розмір								
T02	2.Обточити зовнішню циліндричну поверхню правого фланця Ø750 начорно, начисто.								
O03	3. Обточити поверхню маточини правого фланця Ø500, довжина 150 мм начорно та начисто.								
O04	4. Обточити центральну шийку вала Ø400 начисто								
T05	5. Обточити конусні переходи від центральної шийки до маточин								
T06	6. Зняти фаски на зовнішніх кромках фланців.								
P07									
O08									
OK	Обробка різанням								

Дубл.														
Взамін.														
Підпис										Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

Розробив	Панченко О.В.			КПІ ім.Ігоря Сікорського						
Перевірів	Борщик С.О.									
Н. контр.				ВАЛ					Н	015

Назва операції				Матеріал	
Радіально-свердильна				Сталь 45 ДСТУ 7809:2015	
Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ
	кг				Коод
					1
Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми	
Радіально-свердильний верстат 2М57					
То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР	
				Емульсія	

P		ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1. Встановити деталь вертикально на стіл верстата.								
T02	2. Свердлити 8 наскрізних отворів Ø50 по дільному колу Ø700								
O03	3. Перевстановити деталь вертикально на протилежний (лівий) торець.								
O04	4. Перевстановити деталь вертикально на протилежний (лівий) торець.								
T05									
T06									
P07									
O08									

OK	Обробка різанням
----	------------------

8.1 Вибір пристосування для вертикально-свердлильної операції

Для виконання операції свердління восьми наскрізних отворів $\varnothing 50$ мм у фланцях вала використовується спеціалізоване пристосування на основі потужного поворотного ділильного столу, оснащеного масивною планшайбою та комплектом надійних прихватів. Це обладнання задіяне під час радіально-свердлильної операції для обробки отворів, розміщених по колу $\varnothing 600$ мм, а також для подальшого зенкування фасок.

Конструкція пристосування передбачає наявність елементів для вертикального затискання вала, що забезпечує стабільність деталі при значних зусиллях різання, та механізму точного кутового ділення. Завдяки останньому, позиціювання отворів відбувається автоматизовано, що виключає необхідність розмітки вручну та підвищує точність кроку між отворами.

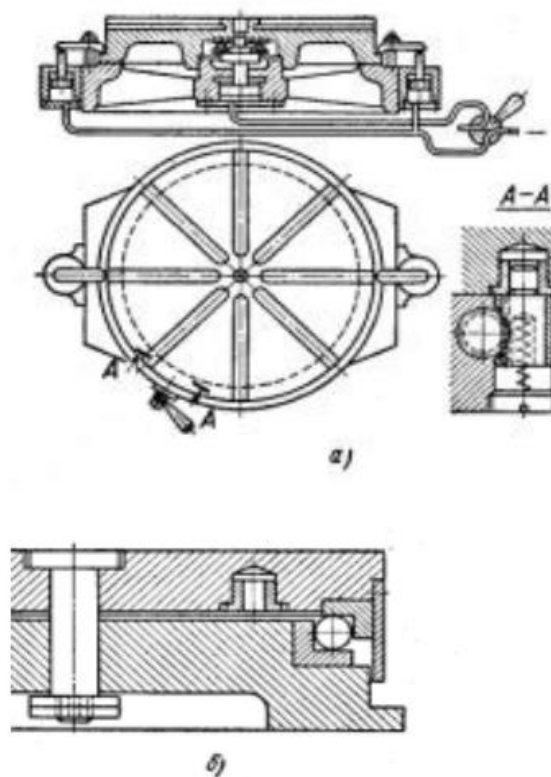


Рисунок 8.3 – Поворотний стіл для базування та валу

Базування масивного вала здійснюється у вертикальному положенні з опорою на торець фланця або через фіксацію по центральній шийці Ø400 мм. Така схема установки запобігає виникненню вібрацій та небажаних зміщень виробу під час роботи інструмента великого діаметра. Габарити та несуча здатність столу розраховані на вагу вала привода та забезпечують зручний доступ до поверхонь фланців Ø750 мм.

З огляду на великий діаметр свердління, для мінімізації відхилення інструмента доцільно використовувати накладну кондукторну плиту з загартованими втулками, яка жорстко кріпиться на оброблюваному фланці.

Робота з пристосуванням розпочинається з установлення масивного вала у вертикальне положення на робочу поверхню столу за допомогою цехового підйомного обладнання, після чого виконується його центрування та надійне закріплення затискними механізмами. Траверсу радіально-свердлильного верстата 2М57 опускають у робочу зону, а шпиндельну головку підводять до осі першого отвору для подальшого наскрізного свердління діаметром 50 мм. Одразу після цього свердло замінюють на конічну зенківку, за допомогою якої на зовнішніх кромках отвору формується необхідна фаска.

Для виконання наступних отворів фіксатор ділильного механізму звільняють, стіл разом із жорстко закріпленою деталлю повертають рівно на 45° і надійно стопорять у новій позиції, після чого цикл свердління та зенкування повторюється до повної обробки всіх восьми отворів на фланці. Після завершення обробки першого фланця вал звільняють, перекантують на 180°, виконують повторне базування у пристосуванні та аналогічним чином проводять обробку другого фланця по відповідному ділильному колу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломного проєкту розроблено модернізовану конструкцію міжкамерної перегородки трубного млина для підвищення ефективності виробництва портландцементу. На основі проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

Напрямок модернізації: За результатами літературно-патентного огляду (зокрема, патенту UA 90518 U) обґрунтовано виконання робочої поверхні міжкамерної перегородки ступінчастою з каскадним розташуванням перфорованих щілин. Це рішення забезпечує ефект самоочищення решітки, усуває засліплення отворів, інтенсифікує транспортування матеріалу між камерами та підвищує загальну продуктивність млина.

Числове моделювання: У програмному комплексі ANSYS виконано статичний структурний аналіз модернізованого барабана та міжкамерної перегородки, виготовлених зі сталі 40X (межа текучості 785 МПа).

Міцність корпусу: Максимальні еквівалентні напруження в корпусі становлять 46,657 МПа, що забезпечує коефіцієнт запасу міцності 16,82 та гарантує експлуатаційну надійність вузла. Отриманий коефіцієнт запасу міцності підтверджує стійкість конструкції до робочих згинальних моментів, маси мелючих тіл та відцентрових сил.

Охорона праці та екологія: Розроблено аспіраційну систему з витратою повітря 18 000 м³/год для видалення цементного пилу. Для зниження шуму до 76–78 дБА передбачено звукоізолювальне укриття барабана та віброізолятори. Екологічність забезпечується поверненням вловленого пилу у технологічний цикл та замкненим водообігом.

Технологія машинобудування: Спроектовано технологічний процес виготовлення базової деталі «Вал». Використання сучасних верстатів з ЧПК

дозволяє оптимізувати виробничі витрати та гарантувати необхідну точність.

Запропонована модернізація трубного млина є повністю працездатною, механічно надійною та доцільною для впровадження в сучасні лінії з виробництва портландцементу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікульонок І.О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 172с.
2. Коваленко І.В., Малиновський В.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: навч. посіб. Київ: Норіта-плюс, 2007. 216с.
3. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв: підручник/ І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. Київ: Інрес: Воля, 2005. 264 с.
4. Міроненко Д.С. Проект модернізації трубного кульового млина: магістерська дисертація. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. 110с.
5. Сучасні конструкції гумових футеровок барабанних кульових млинів/ О.М. Калганкова та ін. Машинобудування та інженерна освіта. 2021. №12(43). С. 27-43.
6. Щербина, В. Ю., Кочерга, А. Ю. (2025). Дослідження руху частинок матеріалу в трубних обертових апаратах. Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (4), 43–50. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2025.348813>
7. Дсту 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 17 с.
8. Котелевський Ю.М. Розрахунок та визначення швидкості обертання кульового млина. Вісник НТУУ «КПІ». 2018. №3(131). С. 45-51.
9. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Гур'єва Л.Н. Технологія виробництва матеріалів і виробів будівельного призначення [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. – 188с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66516>
10. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII
11. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII
12. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення
13. ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої вібрації
14. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні

15. Наказ МОЗ України № 1596 від 14.07.2020 Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони
16. Проектування технологічних процесів машинобудівного виробництва : навч. посібник / С. О. Борщик, В. С. Калаченко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2018. – 280 с.
17. Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 90518 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / В. І. Дирда, В. О. Калашніков, А. П. Левицький, А. М. Пугач, І. В. Хмель, О. В. Стойко. – № u201400547 ; заявл. 20.01.2014 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.
18. Міжкамерна решітка трубного млина : пат. 91514 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / І. О. Мікульонок, Т. В. Олейниченко, С. М. Тихонов. – № u201400394 ; заявл. 17.01.2014 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.
19. Секція розвантажувальної решітки барабанного млина : пат. 144035 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01), В07В 1/00 / Є. Є. Чижик. – № u202002198 ; заявл. 02.04.2020 ; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16.
20. Розвантажувальна частина барабанного млина : пат. 82951 Україна : МПК В02С 17/10 (2006.01), В02С 17/18 (2006.01) / С. Л. Мартиненков, А. Г. Петров, Є. М. Вовненко, О. О. Токарев. – № u201301050 ; заявл. 28.01.2013 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.
21. Розвантажувальний пристрій барабанного млина : пат. 126529 Україна : МПК В02С 17/00, В02С 17/18 (2006.01) / І. В. Глинський, О. О. Токарев, А. Л. Олійник, М. Б. Гершун. – № u201800313 ; заявл. 11.01.2018 ; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.
22. Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 65881 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / Є. Є. Чижик, Г. М. Грунський. – № u201112155 ; заявл. 18.10.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.
23. Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 65733 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / В. І. Дирда, С. Л. Євченко, А. Є. Маркелов, А. М. Пугач. – № u201107060 ; заявл. 06.06.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

- 24.Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 66545 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / В. І. Дирда, С. Л. Євенко, А. Є. Маркелов, А. М. Пугач. – № u201107132 ; заявл. 06.06.2011 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
- 25.Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 66388 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / В. В. Татусь, Р. П. Зозуля, С. Л. Євенко. – № u201113549 ; заявл. 17.11.2011 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.
- 26.Розвантажувальна решітка барабанного млина : пат. 27376 Україна : МПК В02С 17/18 (2006.01) / С. М. Бро, О. Я. Свістельник, А. Є. Михалевич. – № u200707344 ; заявл. 02.07.2007 ; опубл. 25.10.2007.

Додаток

Додаток А

ТАБЛІЦЯ РОЗГЛЯНУТИХ ПАТЕНТІВ

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Мета заявленого технологічного рішення та його використання
1	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 90518	Забезпечення ефекту самоочищення розвантажувальної решітки від застряглих часток під дією ваги мелющих тіл та нових порцій матеріалу. Робоча поверхня виконана ступінчастою з розширенням перфорованих щілин під кутом у бік виходу матеріалу, що унеможливорює заклинювання часток розмелюваного матеріалу та підвищує продуктивність млина. (Прийнято за прототип модернізації).
2	Міжкамерна решітка трубного млина	UA 91514	Оптимізація внутрішньомлинового транспортного процесу цементного клінкеру та добавок, запобігання зворотному пересипанню подрібненого матеріалу з другої камери в першу. Конструкція забезпечує спрямоване переміщення матеріалу за рахунок спеціальної геометрії та нахилу прохідних отворів, мінімізуючи баластний розмел та питомі енерговитрати.

3	Секція розвантажувальної решітки барабанного млина	UA 144035	Підвищення ремонтпридатності, зниження трудомісткості монтажно-демонтажних робіт та експлуатаційних витрат за рахунок модульної (секційної) конструкції. Окремі уніфіковані секції кріпляться незалежно, мають оптимізовану систему перфорації та пази для надійного сполучення, що запобігає розхитуванню при інтенсивних вібраціях.
4	Розвантажувальна частина барабанного млина	UA 82951	Прискорення виведення розмеленого продукту (цементного клінкеру) з млина, ліквідація застійних або баластних зон та підвищення загальної продуктивності агрегату. Вузол містить розвантажувальну решітку та проміжну камеру з елеваторними пристроями (лопатями) спеціальної конфігурації, які примусово піднімають матеріал до цапфи.
5	Розвантажувальний пристрій барабанного млина	UA 126529	Оптимізація вивантаження подрібненого матеріалу, покращення умов аспірації повітря через барабан млина та зниження механічного опору на виході. Пристрій включає решітку та внутрішні вивантажувальні канали зі змінною геометрією, які плавно спрямовують двофазний потік цементу та повітря.
6	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 65881	Інтенсифікація процесів перемішування, просіювання цементного матеріалу та покращення його розподілу з метою зменшення локального забивання отворів. Решітка складається з литих секторів, де робоча поверхня виконана

			рельєфною з чергуванням окремих зон, а суміжні перфоровані щілини розташовані на різних висотних позначках.
7	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 65733	Значне підвищення експлуатаційного ресурсу решітки та захист робочої поверхні від руйнування при ударних навантаженнях. Конструкція передбачає наявність на робочій поверхні спеціальних захисних виступів або ребер асиметричного профілю, які приймають на себе прямі удари падаючих мелючих тіл та збільшують висоту підйому матеріалу.
8	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 66545	Оптимізація напружено-деформованого стану деталі та підвищення надійності решітки при циклічних динамічних навантаженнях. Характеризується виконанням перемичок між суміжними щілинами з радіусними заокругленнями (галтелями) для зниження концентрації напружень та запобігання тріщиноутворенню.
9	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 66388	Збільшення пропускної здатності решітки та покращення умов самоочищення отворів. Перфоровані щілини на секторах виконані не вздовж радіусів, а под косим кутом до них (коса перфорація), що плавно змінюється від центру до периферії відповідно до траєкторії руху завантаження.
10	Розвантажувальна решітка барабанного млина	UA 27376	Зниження навантаження на кріпильні елементи, захист їх від зрізу та виключення протікання нерозмолотого цементного

			матеріалу крізь стики. На торцевих гранях секторів виконані пазогребеневі замки, які утворюють жорстке самофіксоване монолітне кільце под дією відцентрових сил.
--	--	--	--

ДОДАТОК Б

93

[illegible]

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк.	Примітка
				Документація		
A1			ЛП 21.113111.001-70 ТС			
				Складальні одиниці		
	1			Самоскид	1	
	2			Прийомні дункери	1	
	3			Прийомні дункери	1	
	4			Прийомний дункер	1	
	5			Живильник млина	1	
	6			Самоскид	1	
	7			Млин	1	
	8			Димосос	1	
	9			Шламовий насос	1	
	10			Трубний млин	1	
	11			Збірний зумпф	1	
	12			Шламовий басейн	1	
	13			Обертова піч	1	
	14			Колосниковий холодильник	1	
	15			Склад клінкеру	1	
	16			Склад гіпсового каменю	1	
	17			Живильники	1	
	18			Склад шлаку	1	
	19			Живильник	1	
	20			Сушильний барабан	1	
	21			Живильник	1	
ЛП 21.113111.001-70 ТС						
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	Технологічна лінія виробництва портландцементу	
Розроб.	Панченко О.В.					
Перевірив	Швачко Д.Г.				Літера	Аркуш
						Аркушів
						1
Н.контр.					КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРЬСЬКОГО	
Затвердив	Сокольський О.Л.					

[illegible]

ДОДАТОК С

Програмний код що був використаний в програмі C++:

```
#include <iostream>
#include <cmath>
#include <iomanip>

using namespace std;

int main() {
    // Вхідні дані згідно з технічним завданням
    const double D0 = 1.5;    // внутрішній діаметр барабана, м
    const double L0 = 5.4;    // довжина барабана, м
    const double phi = 0.34;  // коефіцієнт заповнення
    const double mu = 0.55;   // коефіцієнт порожнистості
    const double rho = 7.8;   // об'ємна маса мелючих тіл, т/м³
    const double R = 0.75;    // внутрішній радіус барабана, м
    const double gamma_val = 4.56; // насипна вага тіл, т/м³
    const double psi = 0.75;  // відносна швидкість обертання
    const double k = 0.618;   // відношення радіусів шарів
    const double q = 0.035;   // питома продуктивність, т/(кВт·год)
    const int residue = 8;    // залишок на ситі №008, %
    const double K_z = 1.15;  // коефіцієнт запасу
    const double N_dv = 160;  // потужність двигуна, кВт
    const double n_dv = 750;  // частота обертання двигуна, об/хв

    // Розрахунок оптимальної частоти обертання
    double n_opt = 32.0 / sqrt(D0);

    // Зовнішній діаметр барабана
    double D = 1.05 * D0;

    // Довжина барабана
    double L = 1.09 * L0;

    // Діаметр цапфи
    double D_ts = 0.35 * D0;

    // Об'єм камери
    double V = (M_PI * pow(D0, 2) * L0) / 4.0;

    // Маса мелючих тіл
    double m_mel = phi * mu * rho * V;

    // Критична частота обертання
```

```

double n_crit = (30.0 / M_PI) * sqrt(9.81 / R);

// Оптимальна кутова швидкість
double omega_opt = 2.38 / sqrt(R);

// Коефіцієнт тинини помелу
double K;
if (residue <= 2) K = 0.59;
else if (residue <= 3) K = 0.65;
else if (residue <= 4) K = 0.71;
else if (residue <= 5) K = 0.77;
else if (residue <= 6) K = 0.82;
else if (residue <= 7) K = 0.86;
else if (residue <= 10) K = 1.0;
else if (residue <= 12) K = 1.09;
else if (residue <= 15) K = 1.21;
else K = 1.42;

// Продуктивність
double P = 6.45 * V * sqrt(D0) * pow(m_mel / V, 0.08) * q * K;

// Корисна потужність
double G = 0.785 * pow(D0, 2) * L0 * phi * gamma_val;
double term1 = 0.867 * (G / phi) * sqrt(D0) * pow(psi, 3);
double term2 = 9 * (1 - pow(k, 4)) - (16.0/3.0) * pow(psi, 4) * (1 - pow(k, 6));
double N_pol = term1 * term2;

// Розрахункова потужність двигуна
double N_rozr = N_pol * K_z;

// Крутний момент
double M_kr = (9550.0 * N_dv) / n_dv;

// Виведення результатів
cout << "\n";
cout <<
"=====\\
n";
cout << " РЕЗУЛЬТАТИ ПАРАМЕТРИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ТРУБНОГО
МЛИНА\n";
cout <<
"=====\\
n\n";

```

```

cout << "Вихідні дані:\n";
cout << " D0 (внутр. діаметр) = " << D0 << " м\n";
cout << " L0 (довжина)      = " << L0 << " м\n\n";

cout << "Розрахункові параметри:\n";
cout << " n_opt = " << n_opt << " об/хв\n";
cout << " D    = " << D << " м\n";
cout << " L    = " << L << " м\n";
cout << " D_ц   = " << D_ts << " м\n";
cout << " V    = " << V << " м³\n";
cout << " m_мел = " << m_mel << " т\n";
cout << " n_кр  = " << n_crit << " об/хв\n";
cout << " ω_опт = " << omega_opt << " рад/с\n";
cout << " K     = " << K << "\n";
cout << " P     = " << P << " т/год\n";
cout << " N_пол = " << N_pol << " кВт\n";
cout << " N_розр = " << N_rozr << " кВт\n";
cout << " M_кр  = " << M_kr << " Н·м\n\n";

cout << "Рекомендований електродвигун:\n";
cout << " Тип: АИР355М8\n";
cout << " Потужність: 160 кВт\n";
cout << " Частота: 750 об/хв\n";
cout << " ККД: 93.5%\n";
cout << " cos φ: 0.85\n";

return 0;
}

```

```

=====
РЕЗУЛЬТАТИ ПАРАМЕТРИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ТРУБНОГО МЛИНА
=====

Вихідні дані:
D0 (внутр. діаметр) = 1.5 м
L0 (довжина)      = 5.4 м

Розрахункові параметри:
n_opt = 26.1279 об/хв
D     = 1.575 м
L     = 5.886 м
D_ц   = 0.525 м
V     = 9.54259 м³
m_мел = 13.9188 т
n_кр  = 34.5363 об/хв
ω_опт = 2.74819 рад/с
K     = 1
P     = 2.71928 т/год
N_пол = 118.725 кВт
N_розр = 136.534 кВт
M_кр  = 2037.33 Н·м

Рекомендований електродвигун:
Тип: АИР355М8
Потужність: 160 кВт
Частота: 750 об/хв
ККД: 93.5%
cos φ: 0.85

```

ДОДАТОК Д

Дослідження модернізованої міжкамерної перегородки трубного млина

Швачко Д. Г., доцент, Панченко О. В., студент.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

У роботі проведено дослідження конструкції модернізованої міжкамерної перегородки, що функціонує в складі барабана трубного млина. Проведено порівняння базової та модернізованої моделей міжкамерної перегородки за деформаціями, еквівалентними напруженнями та коефіцієнтом запасу міцності. Результати чисельного моделювання підтвердили відповідність конструкції вимогам міцності та її здатність витримувати значні динамічні навантаження, що виникають під час роботи агрегату.

Ключові слова: трубний млин, барабан, міжкамерна перегородка, модернізація.

Вступ. Трубні млини є основним обладнанням для тонкого помелу сировини в будівельній та хімічній галузях [1, 2]. Одним із критичних вузлів, що визначає продуктивність агрегату, є міжкамерна перегородка. Вона забезпечує розділення камер за ступенем подрібнення та регулює поздовжнє переміщення матеріалу вздовж осі барабана.

У звичайних перегородках подрібнений матеріал часто застрягає в щілинах, що знижує продуктивність і потребує зупинок барабана для очищення. Модернізована конструкція за рахунок конусної форми щілин забезпечує примусове продавлювання часток при кожному оберті, реалізуючи ефект самоочищення. Це дозволяє стабілізувати потік матеріалу, зменшити.

Метою роботи є порівняння базової та модернізованої міжкамерної перегородки для підтвердження її міцності в умовах інтенсивних навантажень.

Основна частина. Базова модель міжкамерної перегородки трубного млина виконана у вигляді плоскої конструкції, із паралельними перфорованими щілинами постійного перерізу. Така конструкція є простою у виготовленні, проте в процесі експлуатації вона зазнає інтенсивного абразивного та гідроабразивного спрацювання під дією постійного тиску великого об'єму подрібнюваного матеріалу

та значних динамічних навантажень [3]. Головним конструктивним недоліком базової перегородки є регулярне заклинювання та забивання часток матеріалу в просіювальних щілинах. Це призводить до стрімкого зниження пропускної здатності решітки, порушення стабільності потоку сировини між камерами, падіння загальної продуктивності млина та викликає необхідність частих технологічних зупинок агрегату для примусового очищення.

Модернізована конструкція міжкамерної перегородки кардинально змінює геометрію робочої зони завдяки тому, що щілини зроблені конусної форми. Головною відмінною рисою модернізації є те, що перфоровані щілини виконані конусними — вони розширюються в бік виходу матеріалу, а їхній кут розхилу чітко регламентований і становить $10-28^\circ$ [4] Результати моделювання

Для перевірки доцільності проведеної модернізації трубного млина здійснено статичне моделювання його базової та оновленої конструкцій. Порівняльний аналіз проводився за показниками максимальних загальних деформацій, еквівалентних напружень за Мізесом та мінімального коефіцієнта запасу міцності. Результати розрахунків представлено на рис. 1-6 та таблиця 1

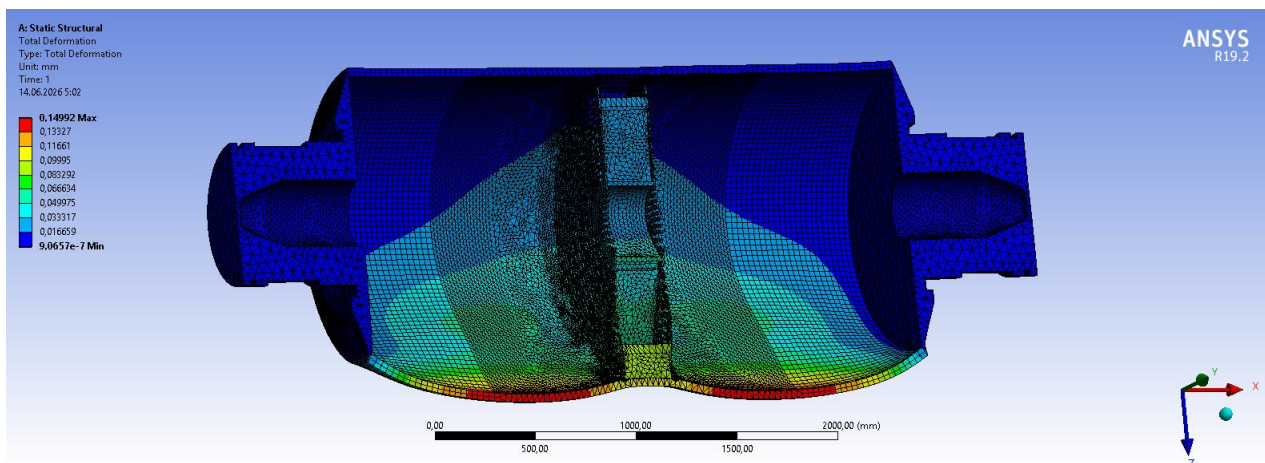


Рисунок 1 – Базовий розрахунок барабана млина на деформацію

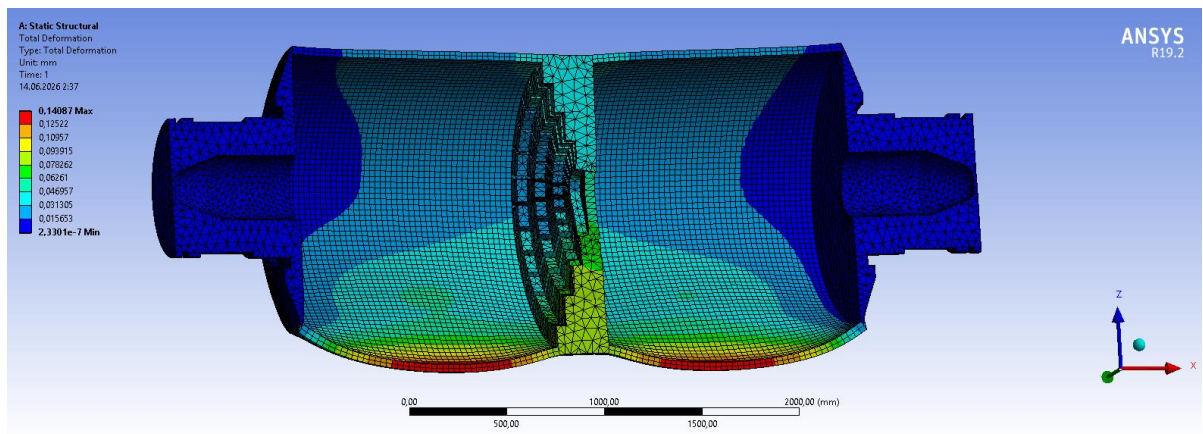


Рисунок 2 – Модернізований розрахунок барабана млина на деформацію

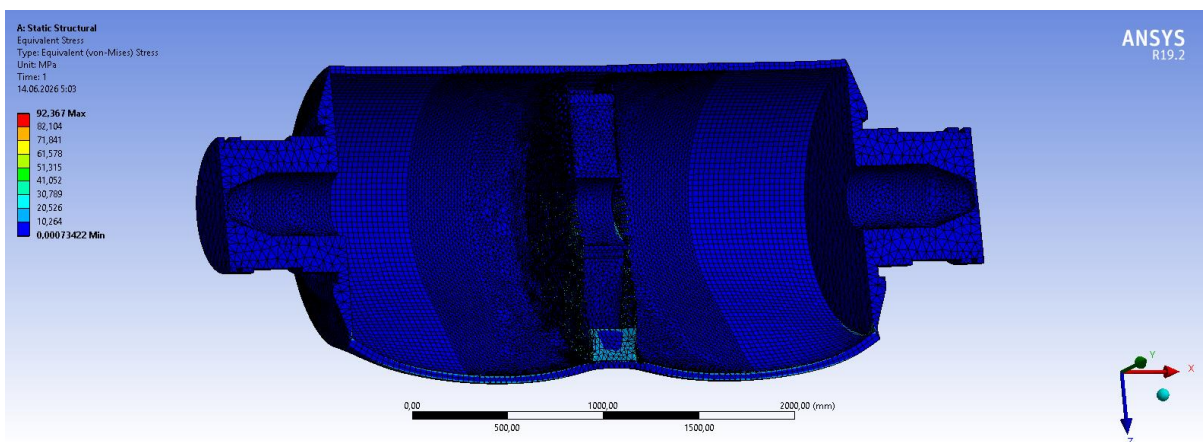


Рисунок 3 – Базовий розрахунок барабана млина на максимальні еквівалентні напруження

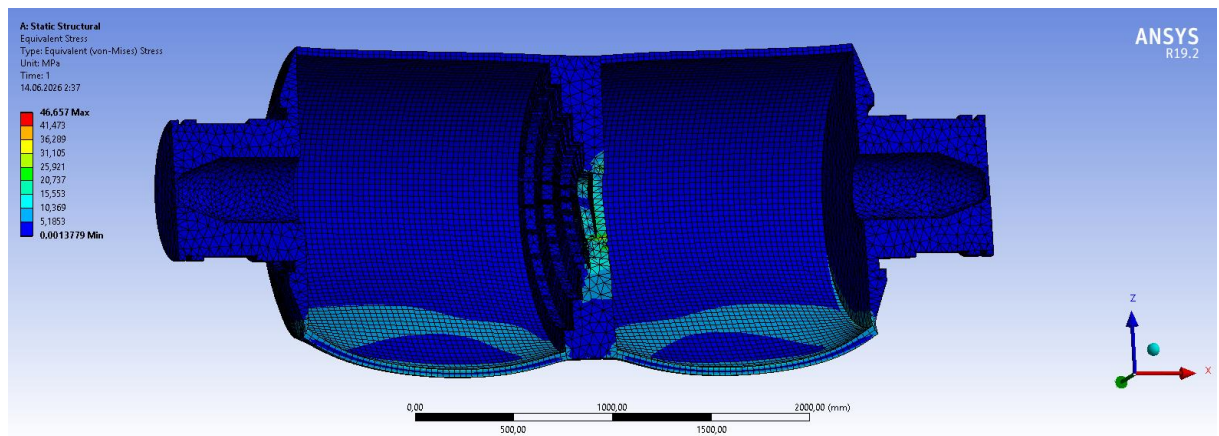


Рисунок 4 – Модернізований розрахунок барабана млина на максимальні еквівалентні напруження

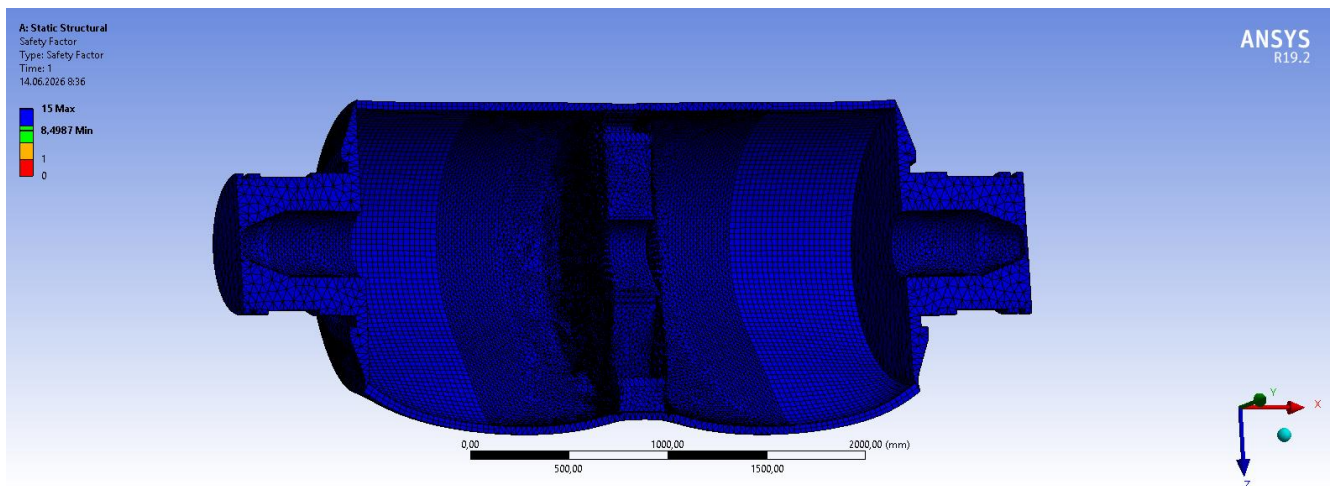


Рисунок 5 – Базовий розрахунок барабана млина на мінімальний коефіцієнт запасу міцності

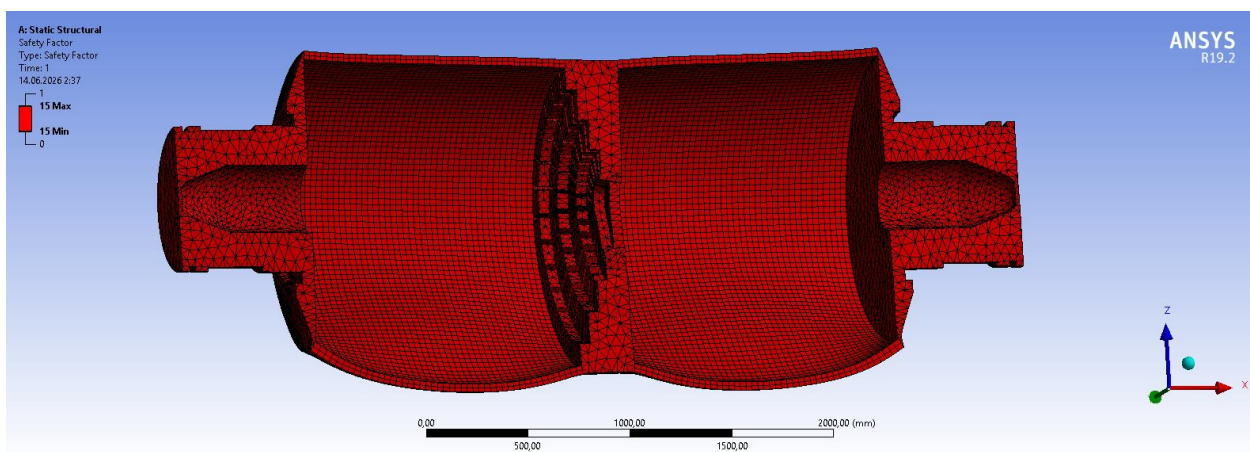


Рисунок 6 – Модернізований розрахунок барабана млина на мінімальний коефіцієнт запасу міцності

Таблиця 1

Порівняння результатів статичного розрахунку базової та модернізованої моделей барабана млина

Результат розрахунку	Базова модель	Модернізована модель	Зміна, %
Максимальна загальна деформація, мм	0,14992	0,14087	–6,04 %
Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа	92,367	46,657	–49,49 %

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності	8.49	16,82	+97,9 %
--	------	-------	---------

Висновок:

Проведено порівняння базової та модернізованої конструкцій міжкамерної перегородки багатокамерного трубного млина. Модернізована конструкція передбачає виконання перфорованих щілин конічними з розширенням у бік розвантаження та їхнє оптимальне розташування по радіусу, що дозволяє усунути забивання отворів, стабілізувати робочу площу живого перерізу та запобігти абразивному застряганню матеріалу всередині плити.

За результатами порівняльного числового моделювання напружено-деформованого стану в середовищі ANSYS встановлено, що максимальна загальна деформація конструкції зменшилася з 0,14992 мм до 0,14087 мм (–6,04 %). Максимальні еквівалентні напруження за теорією Губера-Мізеса суттєво знизилися з 92,367 МПа до 46,657 МПа (–49,49 %). Мінімальний коефіцієнт запасу міцності деталі значно збільшився з 8,49 до 16,82 (+97,9 %).

Отримані результати показують, що модернізована модель міжкамерної перегородки не лише зберігає, але й значно покращує свою працездатність та надійність за заданих умов навантаження. Зменшення загальної деформації свідчить про підвищення жорсткості вузла, що пояснюється раціональним перерозподілом силових навантажень по поверхні оновленої перегородки. Майже двократне зниження пікових еквівалентних напружень та стрімке зростання коефіцієнта запасу міцності доводять успішне усунення небезпечних концентраторів напружень. Усе це свідчить про технічну доцільність запропонованої модернізації, яка забезпечує підвищення експлуатаційного ресурсу млина та прискоренню процесу подрібнення клінкеру без ризику руйнування обладнання.

Перелік посилань

- [1] Мікульонок І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Підручник. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 312 с.
- [2] Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. — Т. 3 (С-Я). — 644 с.
- [3] Мікульонок І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології. Практикум: навч. посіб. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 174 с.
- [4] Патент України № 90518, МПК В02С 17/18. Розвантажувальна решітка барабанного млина / В. І. Дирда, В. О. Калашніков, А. П. Левицький та ін. — № u201400547; заявл. 20.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.