

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

«Допустити до захисту»
Завідувач кафедри БДМБ,
кандидат технічних наук, професор

Владислав НАСТОЯЩИЙ
" ____ " _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: **"Підвищення технічного рівня дорожнього вібраційного
котка при ущільненні дорожніх основ складених відходами
металургійного виробництва"**

Виконав: здобувач освіти групи ГМ-22М-2
спеціальності 133
«Галузеве машинобудування»

Олександр АНТОНЮК
" ____ " _____ 2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи магістра:
кандидат технічних наук, доцент

Сергій КАРПУШИН
" ____ " _____ 2024 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Освітній рівень магістр

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри будівельних,
дорожніх машин і будівництва
_____ проф. Настоящий В.А.
" ____ " _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську роботу студентіві

Антонюк Олександр Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) ***Підвищення технічного рівня дорожнього вібраційного котка при ущільненні дорожніх основ складених відходами металургійного виробництва***

керівник проекту (роботи) *Карпушин Сергій Олександрович, канд. техн. наук, доцент*

затверджена наказом по університету від "26" лютого 2024р. № 5-13

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *01 червня 2024 р.*

3. Вихідні данні до проекту (роботи)

1. *Технічні характеристики дорожнього вібраційного котка ДУ-52;*

2. *Фізико-механічні властивості ґрунтових умов 1-III категорій, відходів металургійного виробництва*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) _
Вступ; Стан питання. Літературно-інформаційний і патентний огляд; Дослідницький; Призначення, технічна характеристика і конструкція дорожнього котка комбінованої дії; Охорона праці; Висновки; Література; Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____
Креслення загального виду – 1,25х(A1); Плакати з дослідницької частини – 4х(A1); Слайди мультимедійної презентації – 15х(A2).

Всього: 11,75х(A1).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Конструкторський	доцент Карпушин С.О.		
Охорона праці	доцент Лізунков О.В.		

7. Дата видачі завдання 26 лютого 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Стан питання. Літературно-інформаційний огляд досліджень з ущільнення ґрунтових основ	26.02.24-20.03.24	
2	Патентний огляд конструкцій пристроїв для ущільнення ґрунтових основ	21.03.-02.04.24	
3	Опис прийнятої конструкції робочого обладнання	03.04.-08.04.24	
4	Дослідницький розділ	09.04.-06.05.24	
5	Апробація роботи	Квітень-травень	
6	Розробка заходів з охорони праці	07.05.-09.05.24	
7	Висновки	10.05.-14.05.24	
8	Розробка графічно-демонстраційних матеріалів і оформлення пояснювальної записки	15.05.-30.05.24	
9	Рецензування	01.06.-10.06.24	

Здобувач _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник КМР _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

[illegible]

АНОТАЦІЯ

Ідея дослідницької частини магістерської роботи полягає в дослідженні особливостей взаємодії вібраційного органу котка з в'язко-пружним середовищем ущільнюваного ґрунту на основі досліджень динаміки даної системи в рамках класичної моделі Прандтля і динамічної релаксаційної моделі ґрунту. Частково в роботі використані результати досліджень Манакіна Є.А. Об'єктом дослідження є вібраційний стан котка з механічним віброзбудником направленої дії і хвилові процеси в пружно-релаксаційному середовищі. Предмет дослідження – параметри динамічного процесу ущільнення, амплітудно-частотні характеристики системи, фазові портрети, релаксаційні стани ґрунту, час і глибина релаксації, ядро ущільнення”.

В дослідницькому розділі застосовані методи дослідження, що засновані на застосуванні основних принципів аналітичної механіки і математичної фізики при виведенні рівнянь динамічних станів, теорії диференціальних рівнянь при побудові коректних рішень.

SUMMARY

The idea of the research part of the master's work is to study the features of the interaction of the vibration body of the roller with the visco-elastic medium of the compacted soil based on studies of the dynamics of this system within the framework of the classical Prandtl model and the dynamic relaxation model of the soil. In part, the results of Manakin E.A.'s research were used in the work. The object of research is the vibration state of a roller with a directional mechanical vibration exciter and wave processes in an elastic-relaxation medium. The subject of research is the parameters of the dynamic process of compaction, amplitude-frequency characteristics of the system, phase portraits, relaxation states of the soil, the time and depth of relaxation, the core of compaction." The research section uses research methods based on the application of the basic principles of analytical mechanics and mathematical physics when deriving equations of dynamic states, the theory of differential equations when constructing correct solutions.

З М І С Т

Вступ.....	2
Розділ 1 СТАН ПИТАННЯ. ЛІТЕРАТУРНО - ІНФОРМАЦІЙНИЙ І ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД.....	5
Розділ 2 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ	39
Розділ 3 ПРИЗНАЧЕННЯ, ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА І КОН- СТРУКЦІЯ ДОРОЖНЬОГО КОТКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ	75
Розділ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ... ..	78
ВИСНОВКИ.....	79
CONCLUSIONS	80
Список використаних джерел	81
ДОДАТКИ.....	84
Додаток А Охорона праці	
Додаток Б Специфікація на креслення загального виду	
Додаток В Мультимедійна презентація з ілюстраційними та графічними матеріалами	

					<i>КМР 2213301 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Антонюк О.М.</i>			<i>Підвищення технічного рівня дорожнього вібраційного котка при ущільненні дорожніх основ складених відходами металургійного виробництва</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушив</i>
<i>Перевірив</i>		<i>Карпушин С.О.</i>					<i>1</i>	<i>84</i>
<i>Реценз.</i>						<i>ЦНТУ зр. ГМ-22М-2</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Яцун В.В</i>						
<i>Затвердив</i>		<i>Настоящий В.А</i>						

ВСТУП

Актуальність теми. У будівництві здатність ґрунтів, кам'яних матеріалів, асфальтобетону та цементобетону протистояти навантаженням, пов'язана з мірою ущільнення цих матеріалів. Ущільнення - процес збільшення щільності матеріалу шляхом додання зовнішніх сил, які можуть бути статичними або динамічними. Найбільш поширеними областями є автомобільні дороги, вулиці і магістралі, аеродроми, земляні греблі, насипи залізниць і фундаменти будівель. Інші області застосування включають складські майданчики, стоянки для машин, промислові та житлові площі, будівництво портів, резервуарів і каналів. Вартість ущільнення складає 3 - 5% від загальної вартості будівництва, однак значення ущільнення в якості та довговічності закінченого об'єкту значна: якщо воно виконане недостатньо або неправильно, то з'являться пошкодження та руйнування, результатом яких буде висока вартість відновлення об'єктів.

Існуюче обладнання для цих робіт використовують для певних умов, що обумовлює необхідність у різних типах машин для ущільнення конкретних матеріалів та технологічних вимог. Тому створення універсальних машин і обладнання для ефективного ущільнення матеріалів є **актуальною науково - технічною проблемою**.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності і технічного рівня вібраційного котка для ущільнення дорожніх основ за рахунок науково обґрунтованих параметрів динамічного режиму ущільнення з урахуванням фізико-механічних характеристик ущільнюваного середовища.

Для досягнення поставленої мети сформульовані і вирішені наступні **задачі дослідження**:

– виконати огляд і аналіз літературно – інформаційних джерел щодо стану питання;

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

– розробити математичну модель, що описує динамічний стан вібраційного котка з врахуванням геометричних і кінематичних умов взаємодії циліндричної поверхні вальця з пружно-в'язким середовищем, і розробити математичну модель, що описує в одновимірному уявленні динамічні релаксаційні деформації ґрунту, що приводять до його ущільнення;

– виконати конструкторські розрахунки модернізованих вузлів;

– розробити графічну частину м.р.;

– розробити технологічний процес на виготовлення деталі модернізованого вузла;

- розробити комплекс заходів щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці.

Ідея дослідницької частини магістерської роботи полягає в дослідженні особливостей взаємодії вібраційного органу котка з в'язко-пружним середовищем ущільнюваного ґрунту на основі досліджень динаміки даної системи в рамках класичної моделі Прандтля і динамічної релаксаційної моделі ґрунту.

Об'єкт дослідження – вібраційний стан котка з механічним віброзбудником направленої дії і хвильові процеси в пружно-релаксаційному середовищі.

Предмет дослідження – параметри динамічного процесу ущільнення, амплітудно-частотні характеристики системи, фазові портрети, релаксаційні стани ґрунту, час і глибина релаксації, ядро ущільнення”.

Методи досліджень засновані на застосуванні основних принципів аналітичної механіки і математичної фізики при виведенні рівнянь динамічних станів, теорії диференціальних рівнянь при побудові коректних рішень.

Структура роботи. Робота містить 84 сторінки, у тому числі 22 рисунки, 3 таблиці, список з 35 використаних джерел, анотацію українською та

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

англійською мовами, мультимедійну презентацію з 19 слайдів, а також 4 аркушів креслень формату A1, включених до мультимедійної презентації. Текст роботи складається із вступу, 4 розділів, висновків за результатами проєктування і трьох додатків на 34 сторінках.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 1

СТАН ПИТАННЯ. ЛІТЕРАТУРНО - ІНФОРМАЦІЙНИЙ І ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД.

1.1. Загальні положення.

Робота практично всіх ґрунтоущільнюючих машин заснована на застосуванні наступних видів взаємодії виконавчого органу (вальця) з ущільнюваним середовищем:

- статичного, коли тиск на ґрунт обумовлюється тільки вагою самої машини і додаткового привантаження;
- ударного, при якому ґрунт сприймає повторно-короткочасне імпульсне навантаження;
- вібраційного, при якому ґрунт піддається періодичним навантаженням з високою частотою.

Можливі також комбінації вказаних способів, наприклад, статично-вібраційного, ударно-вібраційного і ін.

До котків, що працюють за першим принципом, відносяться так звані статичні котки з гладкими вальцями, котки на пневматичних шинах і статичні кулачкові котки на пневматичних шинах (останні чинять на поверхню ґрунту тиск різної величини).

При використанні другого з вказаних принципів удар впливає на поверхню ґрунту із значно більшою силою, ніж при статичному навантаженні. Хвиля стискування розповсюджується углиб масиву, і цим самим можна добитися ущільнення ґрунту 10...15 м[].

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Вібраційні ґрунтоущільнюючі машини працюють в режимі швидко слідуючих один за іншим ударів, кожен з яких чинить тиск на ущільнюваний матеріал. В результаті частинки ґрунту приходять в безперервний коливальний рух відносно один одного, сили зчеплення між ними значно зменшуються, і частинки, що переміщаються, у результаті розміщуються в мінімальному об'ємі []. При ущільненні зв'язних ґрунтів потрібна декілька більша витрата енергії.

Ефективність ущільнення істотно збільшується в результаті поєднання вібраційної дії з статичним тиском.

На рис. 1.1, запозиченому з роботи [], приведені результати вимірювань тиску в ґрунті датчиками мембранного типу, встановлених на глибині 0,2 м, при проході вібраційного котка. Ці дані свідчать про складний характер динамічної і статичної дії на ґрунт, і їх раціональне поєднання, залежно від властивостей ущільнюваного матеріалу, визначає різноманіття ґрунтоущільнюючих засобів, що склалося до теперішнього часу.

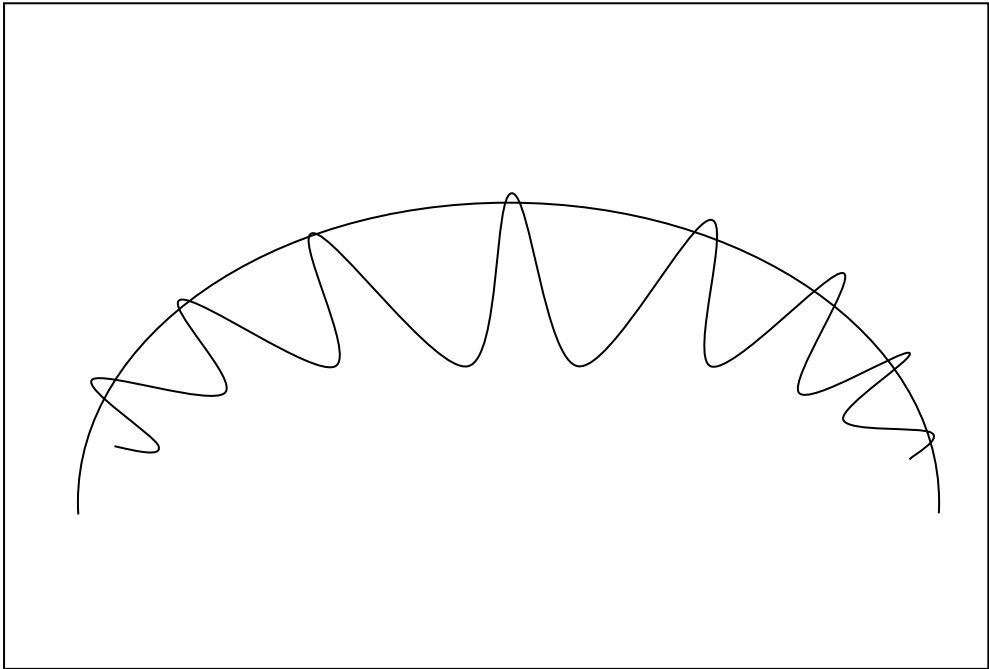
Наукові і експериментальні дослідження в цій області початі ще в 30-х роках минулого століття Д. Д. Барханом і Н. Я. Хархутой [, ,], які вперше розробили теоретичні основи для вибору розрахункових схем ґрунтоущільнюючих машин, дали методику розрахунку їх механічних параметрів і режимів роботи.

Подальшому розвитку теорії і практики ущільнення будівельних матеріалів і руйнування ґрунту присвячені роботи таких учених як В.Л. Баландінський [], С. А., Бауман [,], П. Л. Іванов [], С. В. Кравець [], А.Г.Маслов [], І. І. Назаренко [], Л. В. Назаров [], В. В. Нічке [,], В.І. Сивко [,], Л. А. Хмара [, ,], і багато інших [, ,]. В результаті цих досліджень розроблені теоретичні основи ущільнення ґрунтів, запропоновані нові види ґрунтоущільнюючої техніки.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Одним з найважливіших факторів при ущільненні ґрунту є енергія, що витрачається на виконання цього процесу. При цьому знижується вартість мінімальної витрати енергії для отримання максимального ступеня щіль-

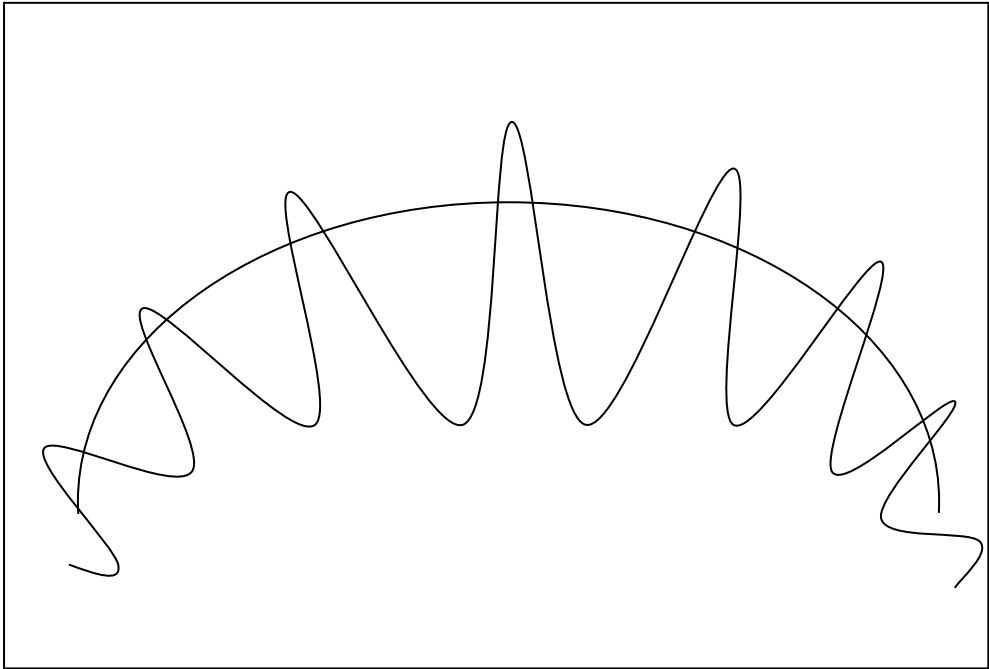
P



а) низькі амплітуди

S

P



б) високі амплітуди

S

Рисунок 1.1 – Розподіл тиску в ґрунті при проході вібраційного котка.

ності ґрунту. Встановлено, що для ущільнення незв'язних матеріалів вібраційним устаткуванням витрачається набагато менше енергії, чим при застосуванні статичних машин.

В даний час для будівництва доріг, будівель, більшості промислових споруд використовуються самі різні матеріали – від глин і піску до кам'яної підсипки. Все більш широкого поширення набувають такі матеріали, як шлак, зола, промислові відходи []. Значні відмінності у фізико-механічних властивостях цих матеріалів, різноманітність погодно-кліматичних факторів і умов будівництва ускладнюють обґрунтування і вибір раціональних конструктивних схем ущільнюючих машин, розробку оптимальних режимів їх роботи. Таке становище зумовлює актуальність проведення подальших досліджень у напрямку створення нової і вдосконаленні існуючої ґрунтоущільнюючої техніки.

В даний час в практиці будівництва земляних споруд знаходять застосування ущільнюючі машини різних типів [], що обумовлене, перш за все, експлуатаційними умовами їх застосування. Як показує досвід, найбільший вплив на вибір ущільнюючої машини мають властивості ущільнюваного матеріалу і об'єм робіт, які можуть істотно розрізнятися для кожного конкретного випадку. У зв'язку з цим з'являються нові, продуктивніші типи машин, удосконалюються машини існуючих конструкцій.

Технічний прогрес в області ущільнюючих машин за кордоном [] характеризується тенденцією створення і вдосконалення комбінованих котків, які дозволяють ущільнювати всі види ґрунтів, забезпечуючи високий ступінь ущільнення при великій продуктивності.

Аналіз патентних матеріалів свідчить про те, що створення нових зразків і вдосконалення, модернізація існуючої ущільнюючої техніки проводиться по наступних напрямках:

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

- створення нового вигляду виконавчих органів машин;
- вдосконалення робочих органів для підвищення їх надійності;
- підвищення якості і продуктивності ущільнення різних по властивостях матеріалів;
- вдосконалення і забезпечення автоматичного управління регулювання роботи виконавчого органу залежно від умов експлуатації.

Далі коротко вкажемо на основні технічні нововведення, що рекомендуються до впровадження вітчизняними і зарубіжними авторами.

У напрямі створення нового вигляду виконавчих органів ущільнюючих машин пропонується конструкція вальця з розташованим усередині силовим циліндром []. Нова конструкція вальця з водилом, шарнірно з'єднаною проміжною ланкою з інерційним бігунком, пропонується в роботі []. Вібраційний каток для ущільнення ґрунту [] забезпечений пневматичним акумулятором з зворотним клапаном, що дозволяє більш повно використовувати масу тягової рами. У роботі [] запропонована машина для обробки дорожніх покриттів, в якій ущільнююче обладнання виконане у вигляді трьох вальців, два з яких розташовані на одній геометричній осі і мають можливість їх осового переміщення. Вібраційний коток [] містить валець, встановлений на рамі за допомогою амортизаторів і жорстко змонтований на ньому за допомогою підшипників дебалансного збудника гармонійних коливань.

Інтерес представляє вібраційний коток [], біля якого валець з дебалансним вібратором в корпусі містить двигун, зв'язаний трансмісіями з вальцем і валом дебалансного вібратора. За рахунок застосування спеціальних датчиків забезпечується резонансний режим роботи в процесі ущільнення ґрунту.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Підвищення якості і продуктивності, за авторським свідоцтвом [], досягається за рахунок того, що валець забезпечений пружними пластинами, розташованими по гребеню кожного ребра вальця і жорстко з ним з'єднаними, які в процесі роботи збільшують глибину опрацювання ґрунту. Вібраційний коток для ущільнення [] має тягову раму, пружний ребристий валець з торцевими елементами і розташований у вальці збудник повздовжніх коливань з штовхачем. Для підвищення якості ущільнення матеріалу пропонується віброкоток [], у якому обидва центральні вали з'єднані з приводом через редуктор, що забезпечує зустрічне обертання валів з дебалансом; корпус редуктора жорстко закріплений на рамі віброкотка. До подібного типу можна віднести віброкоток [], у вальці якого за допомогою підшипників паралельно його осі змонтовані попарно сполучені між собою зубчатою передачею дебалансні вали віброзбудника, зв'язані за допомогою синхронізуючого редуктора з приводом і розміщені в одній площині з віссю обертання вальця.

Підвищення надійності роботи вальця вібраційного котка [] досягається шляхом збільшення терміну служби манжети, за рахунок застосування додаткової манжети, встановленої в порожнині між основною манжетою і активною інерційною масою.

Машина для ущільнення ґрунту [] забезпечена встановленою в задній частині рами вальця, по повздовжній осі машини, шарнірною системою важеля з трьома ступенями свободи, за допомогою якого з'єднані між собою П-подібна рама і рама вальця. Це дозволяє знижувати динамічні навантаження на тягачі. З метою підвищення продуктивності машини для ущільнення ґрунту [], вона забезпечена поперечною опорною балкою, змонтованою на П-подібній додатковій рамі під вальцем.

Стабілізація амплітуди коливань вальця при зміні швидкості його приводного двигуна на вібраційному котку [] досягається застосуванням

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

перетворювача частоти, регулятора струму і вимірювально-перетворювальним пристроєм.

Зниження енергоємності досягається шляхом автоматичного відключення подачі при застосуванні пневмодвигуна на віброкотку [], який забезпечений копрами, закріпленими на внутрішній поверхні вальця.

Самохідний вібраційний коток [] забезпечує автоматичне регулювання статичного моменту дебаланса віброзбудника.

Для вібраційних котків можливе застосування способу автоматичного керування роботою машин віброударної дії [], у якій змінюється величина радіусів кривошипа і кута зсуву їх по фазі.

Із зарубіжного досвіду вкажемо на патент Великобританії [], згідно якому каток представляється таким, що складається з трьох передніх керованих пневмоколів і чотирьох задніх провідних колів, між якими встановлений переміщуваний у вертикальній площині гладкий металевий валець. У патенті Швейцарії [] пропонується віброкоток для ущільнення ґрунтів, що складається з двох шарнірно зчленованих частин: причіпною тягою останній підвішений до своєї рами за допомогою пневматичних амортизаторів. Встановлено експериментально і запатентовано (патент Швейцарії []), що коток з комбінованим робочим органом дає кращі результати, ніж дві самостійні машини, які мають аналогічні робочі органи. Даний ефект має місце при виконанні додаткових умов. Самохідний віброкоток по патентах США [,] має два задніх привідних колеса і передній вібруючий валець, амплітуду коливань якого можна регулювати безступінчато. Валець має дебалансний вал, що приводиться від гідро двигуна.

Фундаментальні теоретичні і експериментальні дослідження в області вібраційних котків виконав в 90-х роках німецький вчений Дітер Пітч []. Ним розглядається комбінований коток, що представляється трьох масовою

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

системою, в якій одна з мас є свого роду «приєднаною» масою ґрунту. Всі маси послідовно сполучені між собою лінійними пружно-в'язкими зв'язками, і рівняння взаємодії, що виходять при цьому, виявляються лінійними.

Таким чином, як впливає з аналізу літературних джерел і патентних матеріалів, можна зробити висновки про те, що комбіновані котки представляють один з головних і перспективних напрямків розвитку ґрунтоущільнюючих машин.

Комбіновані котки – це котки з різними робочими органами. Найбільш широкого поширення набули поєднання пневматичних шин з кулачковими, ґратчастими і гладкими вібраційними вальцями. Аналіз літературних джерел дозволив зробити висновок про те, що створення комбінованих котків проходило по декількох напрямках.

До першого напрямку можна віднести котки, що використовують пневматичні шини тільки для забезпечення стійкості машини. Типовими видами котків цього напрямку є котки фірми-виготовлювача Albaret моделей ТГ 1600Р, ТГ 600Т і ТГ 900 Sismopacter (рис. 1.2, а).

До другого напрямку відносяться котки, що використовують пневматичні колеса для створення тягового зусилля, необхідного для пересування котка, і вони не виконують суттєвої ущільнюючої дії. Спочатку як секція вібровальця використовувалися причіпні віброкотки, що мають свій двигун, коток Compact Mobile фірма-виготовлювач Jimesa (рис. 1.2, б), але надалі почали застосовуватися спеціальні конструкції, що мають привід вібратора від гідравлічної системи тягача (рис. 1.2, в). Менш поширені котки з одним широко профільним колесом, які випускає фірма-виготовлювач Hyster в США, котки 0610В, 0615В, 0620В, 0625В (рис. 1.2, г). Коток складається з шарнірно зчленованого двовісного чотириколісного тягача і секції вібровальця, випускається фірмою виготовлювачем АВG в Німеччині (рис. 1.2, д).

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

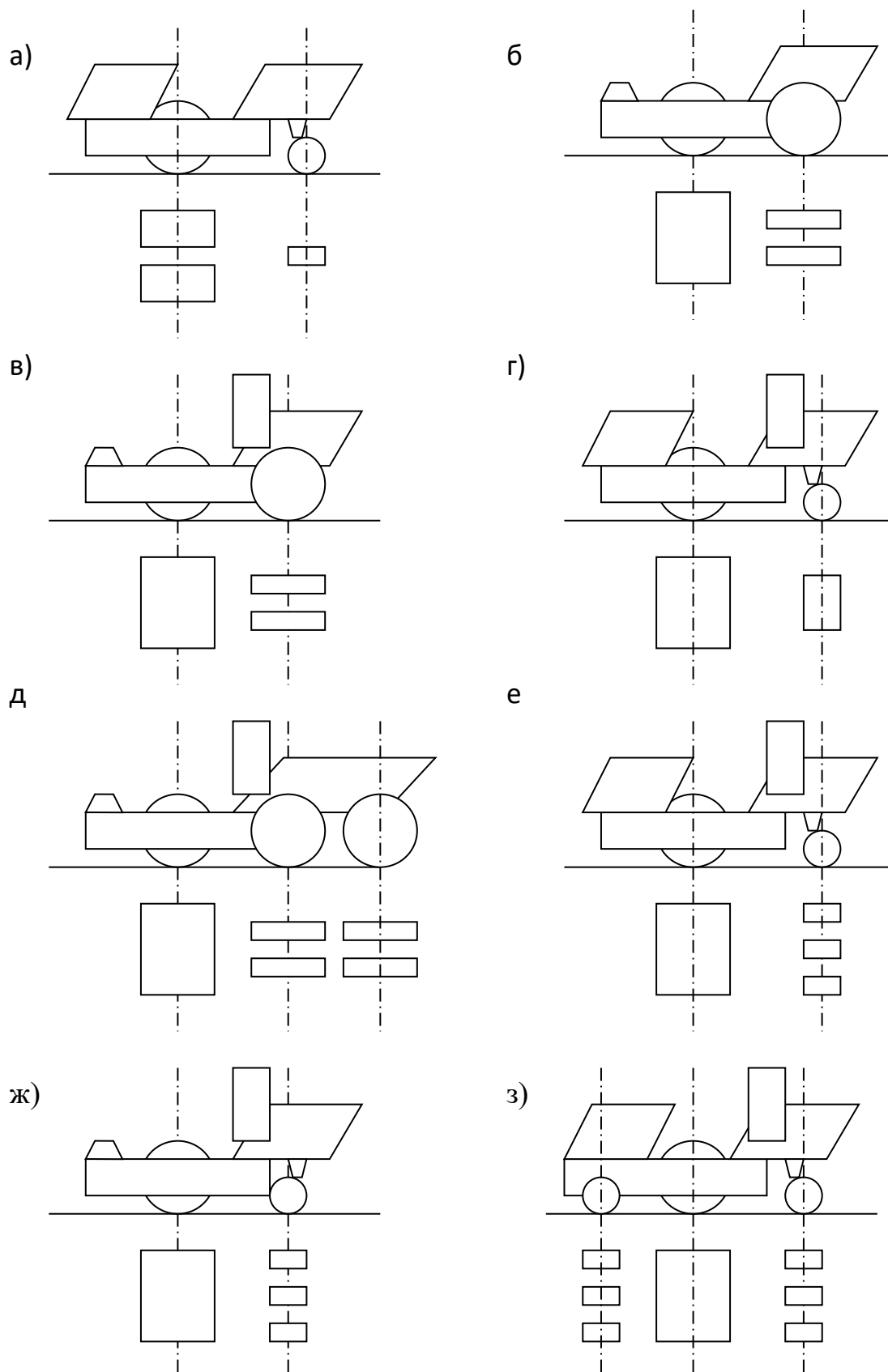


Рисунок 1.2 – Компоновочні схеми комбінованих котків.

Третій напрям представляють котки, створені на базі самохідних гладковальцевих вібраційних котків шляхом заміни одного з вальців секцією пневматичних коліс. Котки цього типу випускає фірма-виготовлювач АВG та інші (рис. 1.2, е).

Четвертий напрям об'єднує котки, створені шляхом шарнірного зчленування одновісного котка на пневматичних шинах і секції вібраційного вальця (рис. 1.2, ж). Такі котки випускаються італійськими, французькими і іспанськими фірмами-виготовлювачами.

До п'ятого напрямку відносяться напівпричіпні і самохідні котки на пневматичних шинах з додатковим підвісним вібровальцем, конструкція яких забезпечує зміну навантаження по осях за рахунок примусового опускання вібровальця (рис. 1.2, з). Самохідний коток подібної конструкції випускається австрійською фірмою-виготовлювачем SVAW. Такі котки володіють високою універсальністю, але вони громіздкі і складні по конструкції.

Шостий напрямок складають котки на пневмоколесах з ґратчастим робочим органом, що взаємодіє з ущільнюваним матеріалом.

Комбіновані котки залежно від типу виконання, параметрів вібрації і наявності додаткового обладнання можуть призначатися для ущільнення асфальтобетонних сумішей і інших бітумомінеральних матеріалів, гравієво-щебених сумішей, ґрунту.

Найбільшого поширення серед комбінованих котків різних типів набули котки на базі одновісних двоколісних тягачів. Котки такого типу в Германії і в деяких інших європейських країнах мають назву «вальценцуг», а найчастіше їх називають «самохідними вібраційними котками».

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

1.2. Огляд і аналіз основних характеристик вібраційного ущільнення.

Найважливішими технічними характеристиками самохідного вібраційного катка є:

- 1) статична вага рами котка і вальця;
- 2) тиск на ґрунт, віднесений до ширини вальця;
- 3) частота коливань збудника;
- 4) статичний момент дебалансу;
- 5) відцентрова сила;
- 6) номінальна амплітуда зовнішнього збудження.

На ефективність ущільнення вібраційними котками у великій мірі роблять вплив наступні параметри: статична вага, лінійний тиск, кількість вібраційних вальців, частота і амплітуда коливань, швидкість руху котка, відношення між вагою рами і вальця, діаметр вальця.

Статична вага залежить від маси котка. При цьому розрізняють три класи котків залежно від їх маси: клас перший – маса $6 \div 9 \text{ т}$, клас другої – маса $9 \div 12 \text{ т}$, клас третій – маса $12 \div 18 \text{ т}$.

Аналіз досвіду експлуатації і результатів експериментальних досліджень свідчить про те, що глибина опрацювання (ущільнення) ґрунту вібраційними котками приблизно пропорційна масі котка, на підставі чого В.Г. Попов [,] рекомендує визначати масу котка по заданій товщині ущільнюваного шару, використовуючи емпіричну формулу:

$$G = 10^4 H^2, \text{ кг}, \quad (1.1)$$

де H – глибина ущільнення м .

Лінійний тиск залежить від діаметру і ширини вібровальців котків. У легких котків діаметр вальця $D = 1,2 \div 1,3 \text{ м}$, ширина $B = 1,6 \div 1,7 \text{ м}$; у середніх $D = 1,4 \div 1,5 \text{ м}$ і $B = 1,9 \div 2,1 \text{ м}$; у важких $D = 1,5 \div 1,6 \text{ м}$ і $B = 2,1 \div 2,5 \text{ м}$.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Н. Я. Хархута [] рекомендує вибирати діаметр вальця віброкатків не менше 1000 мм, а для важких катків – 1600÷1800 мм. Ширина вальця катка при такому виборі повинна перевищувати його діаметр в 1,1÷1,8 разу.

В. Г. Попов і Н. Я. Хархута в роботі [] приводять емпіричну залежність для визначення діаметру вальця D :

$$D = (1,6 \div 2,4)H, \text{ м.} \quad (1.2)$$

Ширина вальця B при цьому розраховується по формулі

$$B = (1 \div 1,2)D, \text{ м.} \quad (1.3)$$

У табл. 1.1 наводяться дані по ГОСТ 13412-67 «Катки прицепные вибрационные с гладкими вальцами» [], регламентований діаметр і ширина вальців залежно від маси катка.

Таблиця 1.1 – Основні параметри і розміри причіпних вібраційних катків по ГОСТ 13412-67.

Найменування параметрів	Норми по типам		
	1	2	3
Маса катка, т	від 3 до 4	від 6 до 8	від 12 до 16
Ширина вальців В, мм	1200	1600	1600
Діаметр вальців D, мм.	1100	1500	1500
Відношення збуджуючої сили до ваги катка не менше	2,5	2	1,5

Катки легкого типу мають лінійний тиск 20–25 Н/мм, середнього 30–35 Н/мм, важкого 40–45 Н/мм. Лінійний тиск і діаметр вальця

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

дозволяють оцінити ущільнюючу здатність котка і належать до визначальних параметрів котків, і їх величини слід призначати залежно від фізико-механічних властивостей ущільнюваного ґрунту.

Лінійний тиск від вібраційного вальця відповідно до роботи [] визначається формулою

$$q_b = K_{AP} \frac{P+Q}{B}, H / м, \quad (1.4)$$

де P – амплітудне значення збуджуючої сили, Q – статична складова навантаження, що доводиться на контактну поверхню вальця, K_{AP} – коефіцієнт перевищення дійсного контактного тиску в порівнянні з розрахунковим. При цьому максимальний контактний тиск вібраційного вальця на ущільнюваний матеріал можна обчислити як

$$G_M = 0,5 \sqrt{\frac{2q_b E_0}{D}}, H / м^2, \quad (1.5)$$

де E_0 – модуль пружності ущільнюваного матеріалу ($H / м^2$).

Важливим параметром вібраційних котків є максимальна величина обурюючої сили P . Існує для кожного з ущільнюваних матеріалів оптимальна величина, при якій досягається якнайкраще ущільнення. В той же час P залежить, природно, від амплітуди збуджуючих коливань. При малих обурюючих силах амплітуди коливань вібровальця незначні, і отже, ущільнююча дія теж невелика. При збільшенні P може відбуватися відрив вальця від ущільнюваного матеріалу, і коливання в цьому випадку набувають ударного характеру. Якщо P перевищує певне критичне значення, то режим коливань стає субгармонійним, тобто за період одного удару вальця об ґрунт дебалансний вал здійснює декілька обертів. При такому режимі знижується частота ударних імпульсів, що призводить до зниження ефективності

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

вібраційного котка. Тому за оптимальний вважається режим, при якому період коливань кратний періоду обурюючої сили.

У роботі [] критичну величину обурюючої сили при ущільненні не зв'язних ґрунтів пропонується визначати по формулі:

$$P_{кр} / P = 1,5 + 0,7(k - 1)^{1,6}, \quad (1.6)$$

де, причому ω – циклічна частота вимушених коливань (частота віброзбудника), ω_0 – циклічна частота власних коливань вальця на ґрунтовій поверхні.

$$\omega_0 = K \sqrt[4]{D} / \sqrt{q_b}, \quad (1.7)$$

де K – емпіричний коефіцієнт (наприклад, для легких котків $K = 20$).

Н. Я. Хархута [] рекомендує для вібраційних котків приймати величину обурюючої сили відповідно до нерівності

$$P \geq (3,4 \div 4,0)Q. \quad (1.8)$$

У роботі [] обурююча сила визначається по формулі

$$P = Q \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)A}{g \cos \varphi}, \quad (1.9)$$

де φ – кут зрушення фаз між переміщенням і обурюючою силою; g – прискорення сили тяжіння m/s^2 ; A – амплітуда коливань mm .

Деякі дослідники вважають, що найбільший ефект ущільнення досягається у тому випадку, коли частота віброзбудника збігається з частотою власних коливань системи «вібровалець – ущільнюваний матеріал», тобто процес ущільнення відбувається в області резонансу.

Величина частоти власних коливань змінна, залежна від стану ґрунту, його фізико-механічних властивостей, ступені ущільнення і від вібруючої маси.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Так, Н. Я. Хархута [] вказує, що частота власних коливань ґрунту заввишки $H = 1 \div 1,2$ м знаходиться в межах від 15 до 28 Гц, і її рекомендується визначати по традиційній формулі, де c – жорсткість основи, m – маса, що коливається. У свою чергу жорсткість основи

$$c = C\sqrt{F_1 F}, \quad (1.10)$$

де C – коефіцієнт пружного рівномірного стискування для площі основи,

F – фактична площа взаємодії вальця з ґрунтом.

Параметри вібрації – частота, амплітуда і сила, що вимушує, взаємозв'язані і залежать не тільки від властивостей ущільнюваного матеріалу, але і від поточного ступеня ущільнення, тобто від швидкості горизонтального переміщення котка, яка у свою чергу обумовлює продуктивність установки.

Експериментально встановлено [], що горизонтальна швидкість вібраційного катка істотно впливає на величину зминання ґрунту, причому при підвищенні швидкості величина зминання знижується. За раціональну швидкість В. Г. Попов [] пропонує приймати таке її значення, при яких зниження величини зминання не перевищує 10 %, і виводить формулу для визначення її граничного чисельного значення:

$$V_{np} = 0,2\sqrt{f}, \text{ км/ч}, \quad (1.11)$$

де f – частота коливань Гц.

А. І. Путк [,] рекомендує наступну формулу для визначення раціональної величини швидкості:

$$V_n = V_{\max}(1 - e^{-kn}), \quad (1.12)$$

де V_n – швидкість при i -му проході,

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$V_{\max}$ – швидкість руху при останньому проході,

k – деякий коефіцієнт, що приймається в межах від 0,1 до 0,6 залежно від параметрів ущільнюваного ґрунту.

Багато дослідників вказують на необхідність зміни швидкості руху віброкотка в процесі ущільнення. Швидкість повинна постійно збільшуватися і досягати максимального значення при останніх проходах котка. У таблиці 1.2 приведені значення глибини ущільнення, що рекомендуються, і необхідне число проходів для традиційних конструкцій вібраційних котків [].

Таблиця 1.2 – Глибина ущільнення при різному числі проходів котка

Найменування параметра	Маса котка, т.		
	3	6	12
Глибина ущільнення, м	0,5-0,6	0,8	1,0-1,2
Необхідне число проходів	6-8	4-5	4-5

Приведені дані є орієнтовними показниками для визначення товщини ущільнюваного шару вібраційними котками і числа проходів по одному сліду.

Для точнішого визначення необхідного числа проходів котка П. І. Путком [,] запропонована формула:

$$n = \frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \frac{k_y - k_0}{k_{\max}} \right), \quad (1.13)$$

де k_y – необхідний коефіцієнт ущільнення;

k_0 – початковий коефіцієнт ущільнення;

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$k_{\max}$ – максимально можливий приріст коефіцієнта ущільнення в наслідок великого числа проходів котка по одному сліду;

β – коефіцієнт, що враховує час на один перехід з однієї смуги ущільнення на іншу.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що глибина ущільнення і необхідне число проходів котка по одному сліду залежать головним чином від виду ущільнюваного матеріалу, і ці параметри повинні встановлюватися в результаті експериментальних досліджень.

1.3. Фізико-механічні характеристики ущільнюваного середовища.

Процес ущільнення полягає в підвищенні щільності матеріалу під дією зовнішніх сил. При цьому відбувається переміщення частинок ґрунту і зменшення об'єму порожнеч, а в крупнозернистих ґрунтах може відбуватися також виділення води. Найбільш важливими факторами, що визначають результати ущільнення, є: тип матеріалу, вологість, метод ущільнення і витрачена енергія.

Процес ущільнення можна розділити на два періоди []. У першому, початковому періоді, переважають зсуви (зсуви) мінеральних часток один відносно одного; у другому переважає їх зближення за рахунок вичавлювання плівок рідкої фази із зон контакту. На другому етапі остаточно формується структура і міцність ущільнюваного матеріалу.

У вивчення проблеми ущільнення великий внесок внесли роботи А. Р. Лебедєва, Н. Н. Іванова, Н. Я. Хархута, Я. А. Калужного, Н. Я. Ульянова, А. Я. Тулаєва, О. Т. Батракова. Всі праці цих учених показують вплив рідкої фази на

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ефективність ущільнення, що підтверджує принципове положення, вперше висунуте П. А. Ребіндером [] про те, що рідка фаза і взаємодія її з мінеральною часткою вирішальним чином впливає як на показники міцності і деформованості, так і на ущільнюваність масиву.

При низькій вологості сили внутрішнього тертя і зчеплення між частками протидіють ущільненню. При вищій вологості матеріал легше піддається ущільненню. Якщо ж кількість води перевищує оптимальну межу, ґрунт стає все більш ущільнюваним, але це приводить до зменшення щільності.

Різні по виду ґрунти в процесі ущільнення поведуться по різному, що обумовлює індивідуальний підхід при виборі техніки і технології ведення робіт по ущільненню.

У проникних ґрунтах, таких як пісок і гравій, які володіють здатністю природного водовідведення, при переорієнтації частинок відбувається віджимання води. Ці матеріали піддаються успішному ущільненню при їх оптимальній вологості, що характеризує середній стан між сухістю і повним водонасиченням.

У глині і інших зв'язних ґрунтах існують значні по величині сили зчеплення, що обумовлене молекулярними зв'язками, що діють між дуже дрібними частинками. Від величини цих сил залежить енергія, що витрачається на ущільнення.

Грубозерністі матеріали, в яких міжмолекулярні сили зчеплення практично відсутні (кам'яне накидання, щебінь, гравій і так далі) ущільнювати легко, ніж дрібнозерністі матеріали, і вібраційним способом їх можна ущільнювати товстими шарами. Присутність в грубозернистих матеріалах порівняно невеликої кількості пилоподібного ґрунту (5 ÷ 10 %) достатньо, щоб зробити ці матеріали водонепроникними, і їх ущільнення стає можливим при оптимальній вологості.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Класифікації ґрунтів, що існують в даний час, не можуть бути такими, що визначають при виборі оптимального методу ущільнення і ущільнюючого обладнання, у зв'язку з цим різними авторами розробляються такі класифікації, в яких враховуються фактори ущільнення. Наприклад, є наступна класифікація, що набула широкого поширення в західних країнах []:

- кам'яне накидання і зернисті ґрунти з крупними каменями і валунами із змістом до 10% частинок, дрібніше 0,06 мм ;
- пісок і гравій із змістом більше 10% частинок, дрібніше 0,06 мм ;
- мул, пиловидні ґрунти, глинистий пісок;
- глина низької і середньої щільності.

Ступінь ущільнення ґрунту – основний параметр, що визначає якість і стабільність земляної споруди. Кінцевою метою ущільнення є забезпечення міцності і довговічності матеріалу, здатного надалі протистояти тим зовнішнім діям, які матимуть місце під час служби ґрунтів в інженерних спорудах або ж в їх основах. В даний час вимоги до ущільнення обмежуються тими значеннями щільності ґрунтів, які мають бути досягнуті у результаті їх ущільнення.

Щільність ґрунту визначається звичайною вагою твердої фази (скелета), яка за рахунок пір, зайнятих водою і повітрям, завжди менше питомої ваги мінеральних частинок. Норми щільності розрізняються по видах земляних споруд, і ґрунтоущільнюючі машини повинні забезпечити таку щільність ґрунтів, які встановлюються відповідними нормами. Щільність, яку необхідно добитися в інженерних земляних спорудах, тобто необхідну щільність, зазвичай визначають з рівності:

$$\rho_0 = k_y \rho_{\max}, \quad (1.14)$$

де $\rho_{\max}$ – максимальна щільність сукупності фракцій ґрунту, що становлять, без урахування порожнеч і рідини,

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

k_y – так званий коефіцієнт щільності.

В даний час немає обґрунтованих норм щільності ґрунтів і матеріалів, а фактичне значення коефіцієнта щільності k_y встановлюється експериментальним шляхом. Н. Я. Хархута і Ю. М. Васільєв [] для відповідальних земляних споруд визначили чисельне значення коефіцієнта ущільнення k_y в межах 0,95-1,0.

На практиці необхідну щільність ґрунтів встановлюють за результатами випробувань їх в спеціальному приладі. За кордоном таким приладом служить прилад Проктора, а в Україні – прилад стандартного ущільнення []. Ці прилади в принципі схожі і дають практично однакові результати.

Досвід експлуатації земляних споруд, наприклад автомобільних доріг, а також численні дослідження свідчать про те, що є необхідність для досягнення якості високого ущільнення, підвищувати коефіцієнт ущільнення до значень $k_y = 1,04 \div 1,08$ []. При цьому приводяться значення коефіцієнта, що рекомендуються, ущільнення, що враховують форму частинок ущільнюваного матеріалу.

У роботі [] пропонується один з можливих методів визначати нормовану щільність залежно від властивостей ущільнюваних матеріалів, способу ущільнення і інших факторів, у вигляді

$$\rho_n = k_y k_\phi k_\Gamma k_0 \rho_T, \quad (1.15)$$

де k_y – коефіцієнт ущільнення, залежний від способу ущільнення;

k_ϕ, k_Γ, k_0 – коефіцієнти, що враховують відповідно форми частинок ущільнюваного матеріалу, граничного ефекту, однорідності по щільності;

ρ_T – максимально можлива теоретична відносна щільність за об'ємом.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Чисельні значення коефіцієнтів рекомендується приймати наступними:

$$k_y = 0,94 \div 0,98, \quad k_\phi = 1,0 \div 1,1, \quad k_\Gamma = 0,92 \div 0,99, \quad k_0 = 0,95 \div 0,98.$$

Система забезпечення контролю якості ущільнення ґрунту включає вхідний, операційний, приймальний і інспекційний контроль. Принципово існують два види контролю [] – прямі і непрямі. До прямих відносяться методи, що дозволяють інструментально визначити щільність скелета ґрунту або пов'язані з нею величини способом відбору проб, пресіометрії, пенітрації, вимірювання фізичних параметрів електричних, акустичних і радіоізотопних полів. До непрямих відносяться методи, що дозволяють якісно оцінити властивості ґрунтів по припиненню зміни їх властивостей в процесі технологічних дій.

Відбір проб для контролю фактичної щільності ґрунту зазвичай здійснюється ріжучими кільцями для піщаних і глинистих порід, або методом лунок для крупнообломочних ґрунтів. Подальший аналіз проби проводять термо-об'ємним ваговим методом зважуючи пробу ґрунту до і після висушування. Основним недоліком методу відбору проб є тривалість лабораторних визначень вологості, а також трудомісткість виконання допоміжної операції – проходку шурфу при контролі по глибині.

Для визначення фактичної щільності ґрунту використовується також метод пресіометрії, який дозволяє інструментально визначити деформації ґрунту в природних умовах при додатку до нього стискуючого навантаження.

В даний час відомі і продовжують розроблятися методи контролю, засновані на використанні змін параметрів фізичних полів в ущільнюваних ґрунтах. До них відносяться електричні, акустичні і радіоізотопні. У будівництві знаходять застосування також на використанні нейтронних і гама-випромінювань.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Сутність методу пенітрації (зондування, проникнення) для контролю фактичної щільності ґрунту полягає у визначенні опору ґрунту введенню в нього конічного наконечника-зонда. Вимірюваною величиною є зусилля або кількість ударів, необхідних для введення наконечника в ґрунті на необхідну величину.

Непрямий метод «по відмові» застосовується, в основному, для оцінки якості поверхневого ущільнення ґрунту за допомогою важких трамбівок. Перевірка відмови проводиться по двох ударах трамбівки. Якщо за результатами контролю заміряна величина відмови виявиться більше встановленої при дослідному ущільненні, проводиться додаткове трамбування.

Таким чином, від якості ущільнення залежить продуктивність роботи віброущільнюючих машин, що слід враховувати при призначенні ступеню ущільнення матеріалів, які у свою чергу необхідно вибирати з урахуванням техніко-економічних показників на тому або іншому об'єкті.

Однією з можливостей зниження вартості земляної споруди є використання різних промислових відходів: шахтних порід, відходів вуглезбагачення, золошлакових сумішей [] і так далі. Ці відходи постійно накопичуються і негативно впливають на навколишнє середовище. Доцільність застосування промислових відходів для земляних споруд визначається зниженням транспортних витрат, а також природоохоронним ефектом.

Перспективним є Донеций регіон, що характеризується великою кількістю шахтних відвалів відходів вугільної промисловості, Криворізький та Маріупольський регіони.

Останнім часом золо-шлакова суміш набула більшого розповсюдження як відпрацьований продукт опалення серед невеликих приватних підприємств, фермерських господарств, зон складування, оптової торгівлі, коледжів, тощо.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Твердими відходами вугільної промисловості є відходи вуглевидобування – вскришні і шахтні породи. Горілі породи – продукт мимовільного випалення порожніх порід в териконах, мінеральна частка яких представлена глинисто-піщаною сумішшю з різним ступенем випалу []. У ній переважають оксиди кремнію, заліза і алюмінію. Переважаючим речовим складом горілих порід є аргіліти, піщаники і алевроліти.

Ґрунти підрозділяють на скельні і рихлі (по класифікації, прийнятій в будівельних нормах і правилах, – нескельні). Скельні ґрунти – породи, що залягають у вигляді монолітного або так званого тріщинуватого масиву; рихлі – крупнообломочні, піщані і глинисті породи. Горілі породи, що є відходами вуглевидобування і схильні до тривалого вивітрювання і високотемпературної «обробки» при samozagoranni дрібних частинок вугілля у відвалах (териконах), чому вони і називаються «горілими», повною мірою відповідають цитованому вище визначенню як нескельний крупнообломочний ґрунт. З цієї причини надалі горілі породи, використовувані при будівництві доріг, часто називатимемо одним ємким терміном – ґрунт.

При будівництві доріг і штучних земляних споруд відходи вуглевидобування можуть застосовуватися як ґрунти в суміші з щебенем, гравієм, піском. Щебінь і пісок для цих цілей повинні відповідати вимогам по гранулометричному складу. При використанні горілої породи у вигляді щебеню необхідно, щоб вона містила зерен лещатної і голчатої форми не більше 35%, зерен слабких порід – не більше 15%, пиловидних, мулистих і глинистих часток – до 3%.

Відходи вугільної промисловості, використовувані для спорудження земляних споруд, зокрема, дорожнього полотна, є крупнообломочною масою з неводостійкою уламковою часткою, з широким діапазоном властивостей і рядом специфічних особливостей, тому для їх випробувань, разом з стандартними методами, застосовуються і методи фізичного моделювання.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ДОРНІІ пропонує методику і пристрій [], що дозволяють виявити особливості поведінки відходів при випробуванні зернистих матеріалів дорожніх конструкцій, яке містить металевий циліндр з розміщеним в ньому пристосуванням для створення статичних і динамічних навантажень.

У роботі [] пропонується пристрій щільноміра для визначення щільності крупнообломочних ґрунтів в лабораторних і польових умовах, який містить конус, сполучений з еластичним балоном і вимірювальне пристосування.

Спосіб контролю якості ущільнення крупнообломочного ґрунту, що включає утворення лунки в ґрунті, визначення її об'єму, визначення об'єму узятій з лунки проби з подальшим встановленням відношення об'єму проби до об'єму лунки, пропонується в роботі [].

Фізико-механічні властивості горілих порід залежать від їх вихідного складу і ступеня випалу, а останнє у свою чергу визначається вмістом вугілля в початковій породі і швидкості його горіння, глибини зони горіння в териконі, середовища горіння і так далі

Найважливішою характеристикою горілої породи як матеріалу для будівництва земляних споруд є її гранулометричний склад, тобто кількісний вміст фракцій різних розмірів.

1.4. Аналіз публікацій.

Аналіз публікацій. Фізична сутність ущільнення ґрунтів полягає у збільшенні щільності його структури механічними засобами за рахунок зміни розміщення твердих частинок ґрунту [1; 3; 11; 12; 14]. Процес ущільнення ґрунтів включає в себе дві паралельні операції: руйнування існуючої структури

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

грунту і створення нової, більш стійкої до різних механічних і природно-кліматичних умов. Чим менш міцна вихідна структура ґрунту, тим легше вона руйнується, а отже, тим ефективніше ущільнюється і навпаки. При ущільненні тверді частинки ґрунту зближуються і витісняють рідку і газоповітряну фази, що призводить до зменшення об'єму, збільшення щільності та до формування міцної структури.

В залежності від характеру дії на матеріал, для його ущільнення використовують два основних типа обладнання. Статичне ущільнююче обладнання використовує власну масу машини, щоб забезпечити зусилля на певну поверхню і ущільнити шар матеріалу. Єдиний спосіб регулювати статичне навантаження, що передається на поверхню, полягає в зміні маси або контактної площі обладнання. Статичні машини забезпечують необхідне ущільнення у верхніх шарах матеріалу. До поширених типів статичних ущільнюючих машин відносяться одновальцові котки, котки на пневматичних шинах (рис.1.3), тандемні котки, та причіпні кулачкові котки [9; 10].

Вібраційне ущільнююче обладнання використовує віброуючий механізм, який зазвичай складається з ексцентрикового вантажу, що обертається. Вібраційні ущільнювачі використовують комбінацію динамічного і статичного навантаження. Вони передають вібрацію на матеріал, що приводить частки в рухається. Це ефективно знижує внутрішнє тертя і приводить частки в стан, в якому утворюється мало порожнеч і висока щільність. Збільшення числа точок зіткнення між частками веде до високої стійкості і міцності. При вібраційному ущільненні досягається вища щільність і більший глибинний ефект, ніж при статичному ущільненні, і повне ущільнення досягається при меншому числі проходів.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 1.3 – Котки статичної дії: а - одновальцевий; б - на пневматичних шинах.

Вібрація може бути використана при ущільненні усіх типів матеріалів, і вібраційне обладнання займає 70 % ринку. Вони можуть виконуватися у вигляді плит та котків різної конструкції (рис. 1.4).

Котки відносяться до числа найбільш продуктивних і порівняно не дорогих засобів ущільнення ґрунтів. Їх можна використовувати не тільки для ущільнення ґрунтів, але і різних основ, гравійно-піщаних підготовок, дорожніх покриттів. За способом агрегування вони діляться на причіпні, напівпричіпні та самохідні. Котки статичної дії виконуються гладенькими, кулачковими, сегментними, решітчастими та пневмоколісними (рис. 1.5).

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



а



б



в



г

Рисунок 1.4 – Обладнання вібраційної дії: а, б - віброплити; в, г – котки.



а



б



в

Рисунок 1.5 – Форма вальців: а - гладенький; б - кулачковий; в - решітчастий

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Гладенькими котками ущільнюють ґрунт на глибину до 10...15 см (рис. 1.5, а). Робочий орган - металічний валець, який являє собою широке колесо з жорстким ободом, яке обертається на осі, що закріплена на рамі. Рама має раму з причіпним пристроєм до базового тягача. На рамі є скребок для очищення робочої поверхні валка від ґрунту, що налипає. Внутрішню порожнину вальця для збільшення маси котка можна заповнювати баластом, який завантажується через люки. Для пошарового ущільнення насипних ґрунтів застосовують в основному тільки причіпні котки, які об'єднані по 5 в одній зчипці. При послідовних проходах котка кожному проходу відповідає своя залишкова деформація ґрунту. При цьому горизонтальна поверхня контакту з ґрунтом по мірі збільшення ступеня ущільнення зменшується. Необхідне число проходів котка встановлюється у результаті пробного ущільнення. При ущільненні незв'язних ґрунтів воно дорівнює 4...6, а у випадку зв'язних ґрунтів досягає 12.

Кулачкові котки відрізняються від гладких тим, що на поверхні котка розміщені кулачки у шаховому порядку (рис. 1.5, б). Опорна поверхня останніх не перевищує 4...5% поверхні циліндра, описаного по вершинах кулачків [13].

Вони призначені для ущільнення важких в'язких і грудкуватих ґрунтів, але не дають позитивного ефекту при роботі на нев'язких ґрунтах тому, що внаслідок високого тиску ґрунт із- під кулачків переміщується в сторони і вгору. Оптимальне число кулачків на 1 м² поверхні складає 25 для легких (масою 8 т), середніх (масою 16 т) і 20 для важких котків (масою 28 т).

Решітчасті котки (рис. 1.5, в) ефективні для ущільнення ґрунтів, які включають мерзлі грудки та інші включення. Порівняно з кулачковими котками такої ж ваги решітчасті котки обробляють ґрунт на дещо більшу глибину. Вальці котків виконують із сталюї решітки, яка відливається окремими ланками або зварюється із пруткового матеріалу. Наявність вікон у решітці створює добрі умови для очищення вальців від налипання ґрунтом.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Існує конструкція котка (рис. 1.6), в якому передбачена можливість встановлення на гладкий валець металевої оболонки з кулачками. Це розширює технологічні можливості такого котка, однак потрібен час на встановлення змінної оболонки.



Рисунок 1.6 – Коток із змінною оболонкою вальця.

Недоліком машин для ущільнення матеріалів є неможливість пристосування до технологічних вимог при зміні видів ґрунтів, а також обмежена кількість форм їх робочого обладнання - вальців. Тому необхідно удосконалити робоче обладнання котків з метою підвищення ефективності процесу ущільнення різних видів матеріалів.

Метою досліджень є розробка пропозицій з удосконалення котків для підвищення ефективності процесу ущільнення різних видів матеріалів.

Результати дослідження. При ущільненні однократне навантаження та розвантаження ґрунту викликає як залишкові, так і пружні деформації, причому залишкові деформації суттєво переважають пружні. При багатократному навантаженні та розвантаженні співвідношення пружної і залишкової деформації поступово змінюється і ґрунт набуває стабільного стану, який характеризується деякими постійними пружними властивостями. Максимальна ефективність ущільнення досягається при контактному тиску [2]

$$\sigma_0 = (0,9...1,0)\sigma_p, \quad (1)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

де σ_p - границя міцності ґрунту.

В якості основної характеристики котка прийнято середній постійний тиск котка

$$q_n = \frac{G}{B}, \text{ Н/м}, \quad (2)$$

де G - сила ваги котка, Н; B - ширина вальця, м.

Максимальний контактний тиск визначається:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{q_n E}{R}} \leq (0,8 \dots 0,9) \sigma_p, \text{ Па}, \quad (3)$$

де E - модуль деформації ґрунту, Па; R - радіус вальця, м; σ_p - гранична міцність ґрунту, Па.

Оптимальна товщина шару ущільнення для:

- в'язких ґрунтів

$$h_{\text{опт}} = 95 \cdot 10^{-5} \omega \cdot \omega_{\text{опт}}^{-1} \sqrt{q_n R}, \text{ м} \quad (4)$$

- нев'язких ґрунтів

$$h_{\text{опт}} = 126 \cdot 10^{-5} \omega \cdot \omega_{\text{опт}} \sqrt{q_n R}, \text{ м} \quad (5)$$

де ω , $\omega_{\text{опт}}$ - вологість і оптимальна вологість ґрунту.

Ширина вальців вибирається в межах

$$B \succ (1,0 \dots 1,2) D, \quad (6)$$

де D - діаметр вальця, м.

На підставі аналізу теоретичних положень процесу ущільнення запропоновано виконувати форму вальця у вигляді виступів та заглиблень (рис. 1.7, а, б). Заглиблення забезпечують наявність на робочій поверхні вальця виступів. При цьому наявність виступів забезпечує передавання навантаження на визначену площину поверхні ґрунту. Це дозволяє збільшити питомий тиск на поверхню матеріалів та підвищити продуктивність процесу ущільнення [7].

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

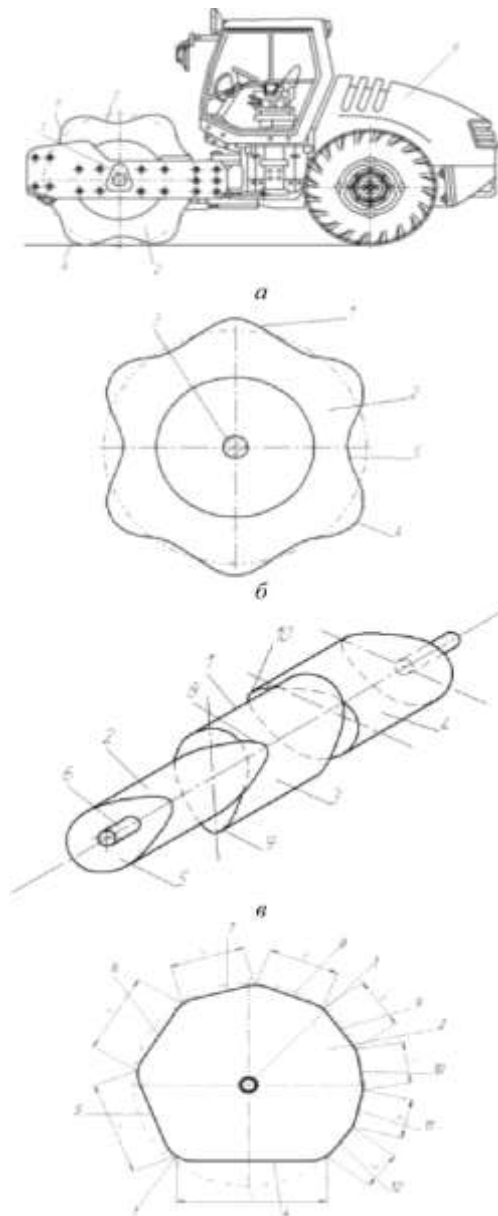


Рисунок 1.7 – Виконання робочого вальця котків: а, б - з виступами та заглибленнями: 1 - робоча поверхня; 2 - бокова поверхня; 3 - вісь; 4 - виступи; 5 - заглиблення; 6 - коток; в - полігональний з кулачками: 1 - валець; 2, 3, 4 - частини вальця; 5 - бокова поверхня; 6 - вісь; 8, 9, 10 - кулачки; г - із змінною довжиною робочих ділянок: 1 - робоча поверхня; 2 - бокова поверхня; 3 - вісь; 4...12 - робочі ділянки.

Подібну дію виконує коток із вальцем, робоча поверхня якого виконана у вигляді кулачків [8], зміщених один відносно іншого полігонально (рис. 1.7, в).

Послідовно збільшує питомий тиск на матеріал валець [5] із змінною довжиною робочих ділянок (рис. 1.7, г).

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Поступово збільшити питомий тиск на поверхню матеріалів дозволяє конструкція котка з декількома робочими вальцями з різним нахилом пневматичних шин на кожній вісі (рис. 1.8). Це змінює площину контактної поверхні шин.

Ефективність ущільнення матеріалів може бути збільшена при використанні котків з додатковим вантажем (рис. 1.9).

Прийомом до різних видів матеріалів, які потрібно ущільнювати, дозволяють котки [4] із змінними вальцями (рис. 8, а, б) та з керованими кулачками [6], які у випадку необхідності виходять із порожнин гладенького вальця (рис. 8, в, г, д).

Прийомом рами причіпного котка виконується заміна одного типу вальця на інший. Ці котки встановлюють необхідний тип вальця для конкретного виду матеріалу та в залежності від його фізико-механічних показників.

Прийомом до різних видів матеріалів, які потрібно ущільнювати, дозволяють котки [4] із змінними вальцями (рис. 1.10, а, б) та з керованими кулачками [6], які у випадку необхідності виходять із порожнин гладенького вальця (рис. 1.10, в, г, д).

Прийомом рами причіпного котка виконується заміна одного типу вальця на інший. Ці котки встановлюють необхідний тип вальця для конкретного виду матеріалу та в залежності від його фізико-механічних показників.

Висновки. 1. Ущільнення матеріалів забезпечує будівельним об'єктам здатність витримувати навантаження від власної ваги об'єктів та дії зовнішніх факторів.

Найбільш поширеним обладнанням для ущільнення матеріалів є котки статичної та вібраційної дії. Основним недоліком такого обладнання є неможливість адаптування котків до різних типів матеріалів.

Розроблені технічні пропозиції котків з різними формами вальців та обладнання із змінними вальцями для ущільнення.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

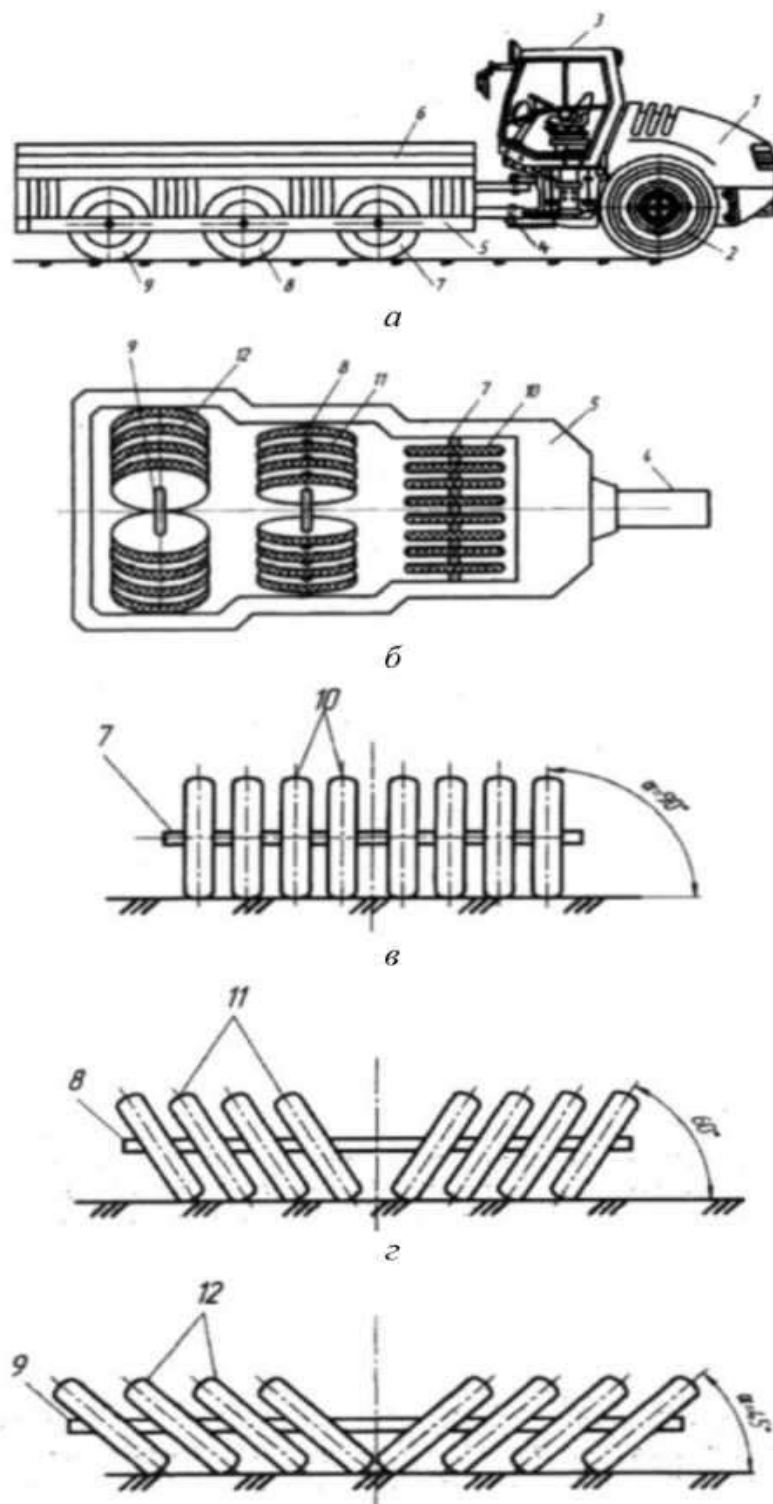


Рисунок 1.8 – Коток з різним нахилом пневматичних шин: а - загальний вигляд; б - вигляд зверху; в - вертикальні шини; г, д - шини з нахилом. 1 - тягач; 2 - ходова частина; 3 - кабіна; 4 - дишло; 5 - рама; 6 - баласт; 7, 8, 9 - робочі вальці; 10, 11, 12 – шини.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

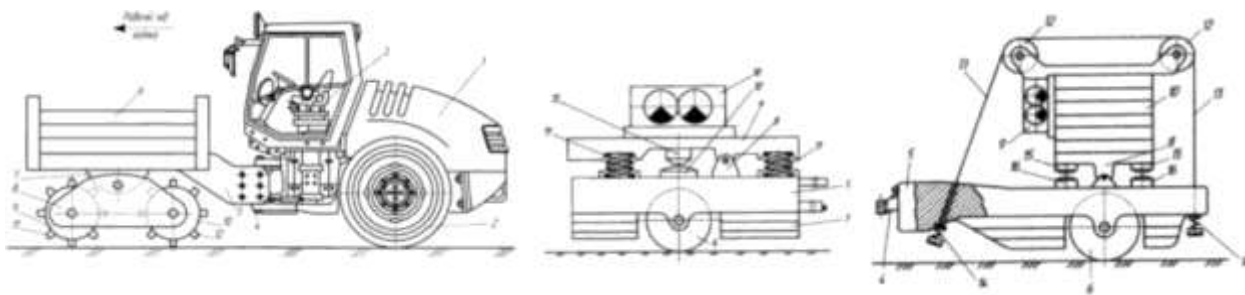


Рисунок 1.9 – Котки з додатковим вантажем: а - статичної дії: 1 - тягач; 2 - ходова частина; 3 - кабіна; 4 - дишло; 5 - рама; 6 - вантаж; 7 - балансир; 8 - рама вальців; 9, 10 - вальці; 11, 12 - кулачки; б - віброударної дії: 5 - рама; 6 - валець; 8 - балансир; 9 - вантаж; 10 - вібратор; 11 - пружини; 12, 13 - ударні елементи; в - віброударної дії: 4 - дишло; 5 - рама; 6 - валець; 8 - балансир; 9 - вібратор; 10 - вантаж; 12 - блоки; 13 - канат; 14 - пружини; 15, 16 - ударні елементи.

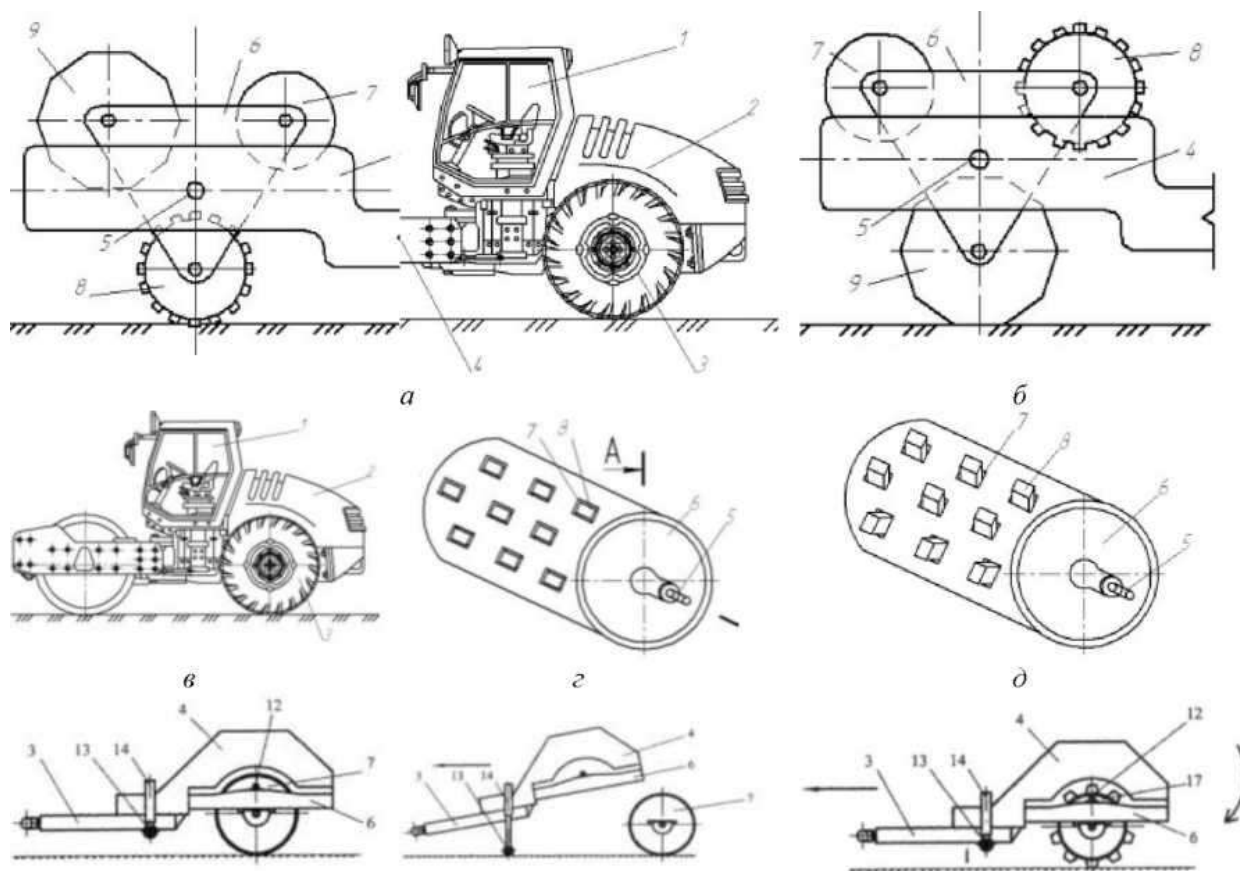


Рисунок 1.10 – Котки, які адаптуються до зміну виду матеріалу: а, б - із змінними вальцями: 1 - кабіна; 2 - двигун; 3 - тягові колеса; 4 - рама; 5 - вісь; 6 - кронштейн; 7, 8, 9 - вальці; в, г, д - з керованими кулачками: 1 - кабіна; 2 - двигун; 3 - тягові колеса; 4 - рама; 5 - вісь; 6 - бокова поверхня; 7 - порожнини; 8 - кулачки; е, ж, з - із змінними вальцями причіпного котка: 3 - дишло; 4, 6 - рама; 7, 17 - валець; 12 - кріплення вальця; 13 - опора; 14 - гідроциліндр підйому рами.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 2

ДОСЛІДНИЦЬКИЙ

При розробці математичних моделей вважати, що ущільнення ґрунту або породних відвалів при будівництві земляних об'єктів здійснюється самохідним одновальцевим вібраційним котком, що складається з тягача і шарнірно з'єднаної з ним рами, всередині котрої закріплено валець з вібраційним збуджувачем, що представляє собою дві неврівноважені маси, що обертаються в протилежні напрямки, чим досягається сувора направленість коливань.

У порівнянні з котками, в яких використовуються кругові коливання, прийняте в роботі суворо направлене вібраційне збудження має наступні незаперечні переваги. По-перше, при шарнірному зчленуванні котка з привідною частиною, що здійснює переміщення котка в горизонтальному напрямі, явно відсутня необхідність урахування їх динамічної взаємодії і взаємовпливу. По-друге, практично відсутній або, принаймні, зводиться до мінімуму шкідлива дія вібрацій на машиніста котка. По-третє, направлене віброзбудження енергетично доцільно, оскільки при цьому не витрачається енергія коливань на непотрібні (по технологічному призначенню котка) вібраційні переміщення вальця в горизонтальному напрямі. Ці міркування зіграли вирішальну роль при виборі розрахункової схеми і при розробці математичної моделі.

При розробці математичної моделі були прийняті наступні робочі гіпотези:

1. Вважається, що коток переміщається по горизонтальній поверхні з постійною швидкістю;
2. Взаємодія котка з приводом не враховується.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

У зв'язку з цим вібраційний коток розглядається як чотирьохмасова нелінійна механічна система [, ,], що включає масу віброзбудника з двома дебалансами, що обертаються, і приведену масу корпусу котка з вальцем. Конструктивне взаєморозташування вказаних елементів не має вирішального значення при побудові математичної моделі. Розрахункова схематизація такої системи зображена на рис. 2.1.

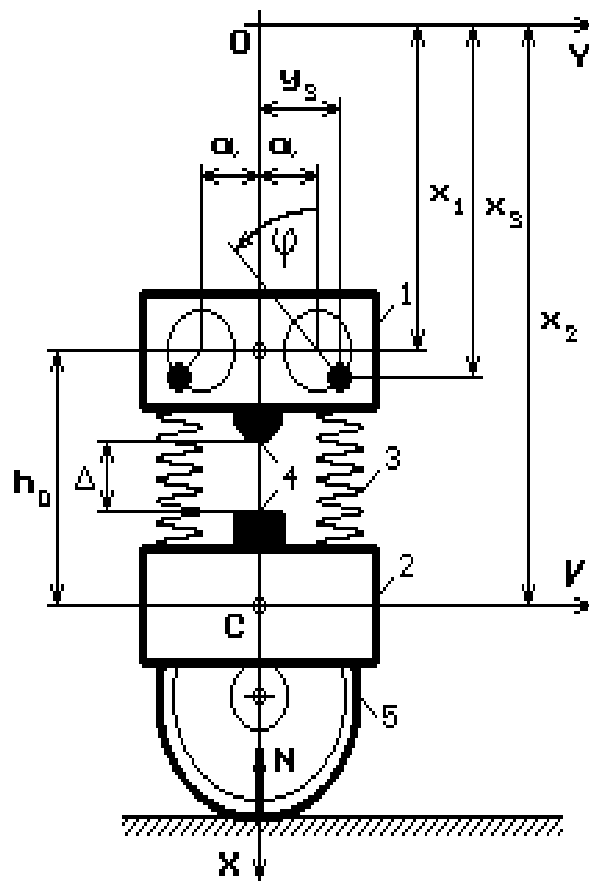


Рисунок 2.1 – Принципова схематизація вібраційного котка.

Тут позначено: 1 – віброзбудник направленої дії; 2 – корпус котка; 3 – пружні елементи підвіски віброзбуджувача; 4 – ударник вібратора (молот-наковальня); 5 – валець котка; x_1 – координата центра ваги віброзбуджувача; x_2 – координата центра ваги корпусу котка; x_3 – координата центра інерції

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

елемента віброзбуджувача, що обертається; φ – кут повороту маси віброзбуджувача, що обертається; Δ – зазор між співударяючимися молотом і наковальнею ударника (в обмежувачі коливань); V – горизонтальна швидкість переміщення котка; N – вертикальна складова реакції ґрунта, залежність котрої від переміщень котка і його параметрів буде розглянута пізніше; h_0 – конструктивний параметр.

В такому уявленні спостерігається в деякому роді «універсальність» розглядуваної фізичної моделі, що включає в себе, як частні випадки, основні типи взаємодії виконавчого органа з ущільнюваним середовищем: статичного, вібраційного, статично-вібраційного і ударно-вібраційного. Остання властивість обумовлюється наявністю в схемі ударника вібратора, котрий являється не тільки штучним обмежувачем амплітуд збуджуючих коливань, але і надає розглядуваній системі характер ударно-вібраційної взаємодії вібратора з корпусом котка у визначених режимах роботи, особливо близьким до резонансних станів [21].

2.1. Загальна математична модель вібраційного котка

Насамперед, з допомогою рис.2.1 встановим, що центр інерції (ваги) елемента віброзбуджувача, що обертається має координати, що визначаються співвідношеннями:

$$x_3 = x_1 + e \cos \varphi, \quad y_3 = a + e \sin \varphi, \quad (2.1)$$

де e – радіус інерції елемента, що обертається. Тоді з (2.1) маємо

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_1 - e\dot{\varphi} \sin \varphi, \quad \dot{y}_3 = e\dot{\varphi} \cos \varphi,$$

де крапка над змінною символізує похідну по часу t . Відповідно, квадрат швидкості елемента віброзбуджувача, що обертається є:

$$V_e^2 = \dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2 = \dot{x}_1^2 - 2e\dot{x}_1\dot{\varphi} \sin \varphi + e^2\dot{\varphi}^2. \quad (2.2)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Таким чином, кінетичну енергію двох однакових мас вібробудувача, що обертаються при їх жорсткому кінематичному зв'язку можна записати в формі

$$T_e = m_e V_e^2 + J_e \dot{\varphi}^2 = (m_e e^2 + J_e) \dot{\varphi}^2 + m_e (\dot{x}_1^2 - 2e\dot{x}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi),$$

де m_e і J_e – відповідно маса і центральний момент одної маси вібробудувача, що обертається.

Загальна кінетична енергія котка складається з T_e , кінетичної енергії маси корпусу вібробудувача $m_1 \dot{x}_1^2 / 2$ і корпусу котка $m_2 \dot{x}_2^2 / 2$:

$$T = (m_e e^2 + J_e) \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} (m_1 + 2m_e) \dot{x}_1^2 - 2m_e e \dot{x}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 \quad (2.3)$$

де m_1 – маса корпусу вібробудувача; m_2 – маса корпусу котка з врахуванням маси вальця.

В тому випадку, коли в ударнику молот і наковальня не приходять в сумісне дотикання один з одним, потенціальна енергія системи запишеться як

$$U = -(2m_e x_3 + m_1 x_1 + m_2 x_2)g + \frac{c}{2} [x_2 - (x_1 + h_0)]^2. \quad (2.4)$$

Тут перший доданок представляє собою потенціальну енергію двох мас вібробудувача, що обертаються, маси корпусу вібробудувача, і маси котка в гравітаційному полі Землі (знак «мінус» перед першим доданком означає, що центри ваги перерахованих мас розташовані нижче точки відрахунку координат, прийнятої на рис. 2.1).

Другий доданок в (2.4) є потенціальна енергія пружного стиску пружин вібробудувача, причому c – сумарна жорсткість пружних елементів підвіски корпусу вібробудувача.

Так як функція Лагранжа є $L = T - U$, то з допомогою виразів (2.3) і (2.4) визначимо її в формі:

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$L = (m_e e^2 + J_e) \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} (m_1 + 2m_e) \dot{x}_1^2 - 2m_e e \dot{x}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \\ + [(2m_e + m_1)x_1 + 2m_e e \cos \varphi + m_2 x_2] g - \frac{c}{2} (x_2 - x_1 - h_o)^2. \quad (2.5)$$

Врахування сил «шкідливих» опорів здійснимо з допомогою функції Релея [], тобто будемо рахувати, що ці сили пропорційні першим степеням швидкості переміщення рухомих мас (так звані сили вязкого тертя):

$$R = \frac{b_1}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{b_2}{2} \dot{x}_2^2 + \frac{b_3}{2} V_e^2,$$

де b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти опору. Підставляючи сюди замість V_e його визначення згідно формулі (2.2), отримаємо для функції Релея наступний вираз:

$$R = \frac{b_1 + b_3}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{b_2}{2} \dot{x}_2^2 + \frac{b_3 e^2}{2} \dot{\varphi}^2 - b_3 e \dot{x}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi. \quad (2.6)$$

Коефіцієнти опору являються експериментально визначними параметрами.

В рамках концепції Релея існує декілька робочих гіпотез, одною з котрих є так звана *гіпотеза зовнішнього тертя* [], котру приймемо для опису дисипативних властивостей механічної системи, що розглядається. Згідно цій гіпотезі величини коефіцієнтів опору пропорційні масам M_i , що входять в механічну систему елементів, тобто

$$b_i = 2\delta_i M_i \Omega_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2.7)$$

де δ_i – безрозмірний коефіцієнт затухання коливань, Ω_i – деякий параметр, що має розмірність циклічної частоти коливань. Для дослідницької мети в якості такого параметра можна приймати відповідну парціальну частоту коливань маси M_i або іншу підходящу величину розмірності частоти (деяка невизначеність в такому визначенні в підсумку просто скажеться на

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

численних значеннях безрозмірних коефіцієнтів затухання коливань δ_i при відомих з експерименту величинах коефіцієнтів опору).

Для отримання рівнянь руху будемо виходити з рівнянь Лагранжа другого роду в формі

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2.8)$$

де q_i – узагальнені координати рухомих мас механічної системи, $\dot{q}_i$ – узагальнені швидкості відповідних мас, Q_i – узагальнені сили, що діють на i -ту масу. Для розглядуваної системи в якості узагальнених координат прийmemo $q_1 = x_1$, $q_2 = x_2$, $q_3 = \varphi$, тому, завдяки (2.5) і (2.6), для входящих в рівняння (2.8) відповідних частних похідних отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} &= (m_1 + 2m_e)\dot{x}_1 - 2m_e e \dot{\varphi} \sin \varphi, & \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} &= m_2 \dot{x}_2, \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} &= 2(m_e e^2 + J_e)\dot{\varphi} - 2m_e e \dot{x}_1 \sin \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1} &= (m_1 + 2m_e)g + c(x_2 - x_1 - h_0), & \frac{\partial L}{\partial x_2} &= m_2 g - c(x_2 - x_1 - h_0), \\ \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= -2m_e e \dot{x}_1 \dot{\varphi} \cos \varphi - 2m_e e g \sin \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial \dot{x}_1} &= (b_1 + b_3)\dot{x}_1 - b_3 e \dot{\varphi} \sin \varphi, & \frac{\partial R}{\partial \dot{x}_2} &= b_2 \dot{x}_2, \\ \frac{\partial R}{\partial \dot{\varphi}} &= b_3 e^2 \dot{\varphi} - b_3 e \dot{x}_1 \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Приймаємо також в силу особливостей системи

$$Q_1 \equiv 0; \quad Q_2 = -N; \quad Q_3 = M_{\partial e} - M_c, \quad (2.12)$$

де, як відмічалось вище, N – вертикальна складова реакції ґрунту; $M_{\partial e}$ – момент, що розвивається двигуном; M_c – момент сил «шкідливих» опорів

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

при обертанні дебалансів віброзбуджувача, що виникають за рахунок тертя в підшипниках і редукторних парах.

Підстановка (2.9), (2.10), (2.11) і (2.12) в рівняння Лагранжа (2.8) приводить до наступної шуканої системи диференціальних рівнянь руху:

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + 2m_e)\ddot{x}_1 - 2m_e\ddot{\varphi}\sin\varphi - 2m_e\dot{\varphi}^2\cos\varphi + (b_1 + b_3)\dot{x}_1 - b_3e\dot{\varphi}\sin\varphi - \\ - (m_1 + 2m_e)g - c(x_2 - x_1 - h_0) = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 + b_2\dot{x}_2 - m_2g + c(x_2 - x_1 - h_0) = -N, \\ 2(m_e e^2 + J_e)\ddot{\varphi} - 2m_e\ddot{x}_1\sin\varphi + b_3e^2\dot{\varphi} - b_3e\dot{x}_1\sin\varphi + 2m_e g\sin\varphi = \\ = M_{\partial e} - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

З допомогою цієї системи перейдемо до рівнянням малих коливань відносно положень рівноваги мас m_1 і m_2 []. Для цього спочатку положимо в (2.13) рівними нулю всі динамічні компоненти системи, тобто приймемо $\dot{x}_1 \equiv 0$, $\ddot{x}_1 \equiv 0$, $\dot{x}_2 \equiv 0$, $\ddot{x}_2 \equiv 0$, $\dot{\varphi} \equiv 0$, $\ddot{\varphi} \equiv 0$, і, таким чином, залишившіся компоненти системи будуть описувати її статичний стан. В результаті такої операції отримаємо з перших двох рівнянь (2.13):

$$\begin{aligned} (m_1 + 2m_e)g + c(\bar{x}_2 - \bar{x}_1 - h_0) &= 0, \\ -m_2g + c(\bar{x}_2 - \bar{x}_1 - h_0) &= -N_{cm}, \end{aligned}$$

де $\bar{x}_1$ і $\bar{x}_2$ – статичні переміщення відповідно мас m_1 і m_2 , N_{cm} – статична реакція ґрунта. Звідси знаходимо:

$$\left. \begin{aligned} N_{cm} &= (m_1 + 2m_e)g + m_2g = m_{II}g, \\ \bar{x}_2 - \bar{x}_1 &= \frac{(m_1 + 2m_e)g}{c} - h_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

де $m_{II} = m_1 + 2m_e + m_2$ – повна маса котка.

Тепер представляється можливим ввести нові змінні для лінійних переміщень, прийнявши

$$x_1 = \bar{x}_1 + \tilde{x}_1, \quad x_2 = \bar{x}_2 + \tilde{x}_2, \quad (2.15)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

де $\tilde{x}_1$ і $\tilde{x}_2$ – малі динамічні переміщення мас m_1 і m_2 відносно їх положень рівноваги. Так як з (2.15) слідує, що

$$\dot{x}_1 = \dot{\tilde{x}}_1, \quad \dot{x}_2 = \dot{\tilde{x}}_2, \quad \ddot{x}_1 = \ddot{\tilde{x}}_1, \quad \ddot{x}_2 = \ddot{\tilde{x}}_2, \quad (2.16)$$

то система рівнянь для нових змінних $\tilde{x}_1$ і $\tilde{x}_2$ при підстановці (2.15) і (2.16) в систему (2.13) з врахуванням рівностей (2.14) прийме вид (тут і далі знак «тільда» над символами x_1 і x_2 опускаємо для скорочення запису):

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + 2m_e)\ddot{x}_1 - 2m_e\ddot{\varphi}\sin\varphi - 2m_e\dot{\varphi}^2\cos\varphi + (b_1 + b_3)\dot{x}_1 - b_3e\dot{\varphi}\sin\varphi + \\ + c(x_1 - x_2) = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 + b_2\dot{x}_2 + c(x_2 - x_1) = N_{cm} - N, \\ 2(m_e e^2 + J_e)\ddot{\varphi} - 2m_e\ddot{x}_1\sin\varphi + b_3e^2\dot{\varphi} - b_3e\dot{x}_1\sin\varphi + 2m_e g\sin\varphi = \\ = M_{\partial\theta} - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Перші два рівняння (2.17), таким чином, описують малі динамічні переміщення корпусу віброзбуджувача і корпусу котка, а третє рівняння цієї системи фактично по формі співпадає з третім рівнянням системи (2.13).

При досить потужному двигуні, що приводить в обертання дебаланси віброзбуджувача (або, як прийято говорити, «в системах з необмеженою потужністю» []), можна вважати, що

$$\dot{\varphi} = \nu = const, \quad \ddot{\varphi} \equiv 0, \quad (2.18)$$

де ν – частота обертання мас віброзбуджувача, і тоді

$$\varphi = \nu t. \quad (2.19)$$

Замітимо, що співвідношення (2.18) і (2.19) мають місце також для приводу з жорсткою характеристикою, наприклад, для синхронних електродвигунів. В цьому випадку перші два рівняння системи (2.17) приймуть вид:

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + 2m_e)\ddot{x}_1 + (b_1 + b_3)\dot{x}_1 + c(x_1 - x_2) = 2m_e\nu^2\cos\nu t + b_3e\nu\sin\nu t, \\ m_2\ddot{x}_2 + b_2\dot{x}_2 + c(x_2 - x_1) = N_{cm} - N, \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

а третє рівняння, записане в формі

$$-2m_e \ddot{x}_1 \sin \nu t + b_3 e^2 \nu - b_3 e \dot{x}_1 \sin \nu t + 2m_e g \sin \nu t = M_{\partial e} - M_c ,$$

представляє собою вираз, визначаючий величину моменту двигуна, необхідного для забезпечення виконання умов (2.18).

Виключивши звідси $\ddot{x}_1$ з допомогою першого рівняння системи (2.20), отримаємо

$$M_{\partial e} = M_c + b_3 e^2 \nu + \dot{x}_1 e \left[\frac{2m_e (b_1 + b_3)}{m_1 + 2m_e} - b_3 \sin \nu t \right] + \frac{2m_e e c}{m_1 + 2m_e} (x_1 - x_2) - 2m_e g \left[\frac{e \nu b_3}{(m_1 + 2m_e) g} - 1 \right] \sin \nu t - \frac{4m_e^2 e^2 \nu^2}{m_1 + 2m_e} \cos \nu t . \quad (2.21)$$

З виразу (2.21) слідує, зокрема, фізичний сенс коефіцієнта опору b_3 . Так, в рамках концепції гіпотези зовнішнього тертя у відповідності з формулою (2.7) вважаємо $b_3 = 2\delta_3 m_e \nu$, і тоді друге складове в (2.21) прийме вид

$$M_{mp} = b_3 e^2 \nu = (2m_e \nu^2 e) \delta_3 e , \quad (2.22)$$

в котрому вираз в дужках представляє собою відцентрову силу, що виникає при обертанні двох дебалансних мас з кутовою швидкістю ν . Ця відцентрова сила, навантажуючи підшипники в радіальному напрямку визиває додаткові сили тертя, котрі, будучи помноженими на $f_{mp} r_{nod}$, визначають момент сил тертя (тут f_{mp} – коефіцієнт тертя кочення, r_{nod} – ефективний радіус підшипника). Вираз (2.22), відповідно, можна представити у виді

$$M_{mp} = 2m_e \nu^2 e f_{mp} r_{nod} [\delta_3 e / (f_{mp} r_{nod})] . \quad (2.23)$$

Для того щоб це на самому ділі являлось моментом сил тертя в підшипниках, необхідна рівність одиниці множителя в квадратних дужках в (2.23), що приводить до співвідношення $\delta_3 = f_{mp} r_{nod} / e$. Таким чином,

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

коефіцієнт δ_3 визначеним чином зв'язаний з коефіцієнтом тертя в підшипниках кочення дебалансів.

Рух механічної системи, що розглядається з постійною частотою обертання дебалансів будемо умовно називати *стаціонарним збудженням*. Очевидно, і це буде показано в подальшому, стаціонарне збудження по витоку часу перехідних процесів приводить до встановившогося динамічного стану, при котрому переміщення x_1 і x_2 являються періодичними функціями з постійними амплітудами. Такий коливальний процес в механіці називається *стаціонарним* [21].

Як видно з (2.22), момент, розвиваємий двигуном при обертанні дебалансів, в установившомуся русі при стаціонарному збудженні являється деякою періодичною функцією, якщо періодичними являються рішення системи (2.20) x_1 і x_2 . Середнє значення $M_{\text{ов}}$ оцінюється величиною

$$M_c + b_3 e^2 v = M_c + M_{\text{тр}},$$

тобто визначається моментом сил опору і моментом сил тертя при обертанні дебалансів, обумовлених відцентровими силами. Амплітудне значення $M_{\text{ов}}$ може досягати істотно більших величин, тому для виконання умов (2.18) двигун повинен володіти не тільки «необмеженою потужністю», але і абсолютно жорсткою характеристикою, що забезпечує незалежність частоти обертання від моментного навантаження. Такі властивості притаманні синхронним електродвигунам або спеціальним регульованим електродвигунам постійного струму. В загальному випадку, коли двигун має так звану *мяку характеристику*, при котрій частота обертання зменшується при збільшенні момента сил опорів (такі властивості характерні, зокрема, для двигунів внутрішнього згорання), умова (2.18) принципово невиконані, і тоді необхідно інтегрувати повну систему трьох рівнянь (2.17).

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2.2. Нелінійні рівняння динаміки

Одна з форм стаціонарного руху може бути і в тому випадку, коли амплітуда коливань маси віброзбуджувача стає настільки великою, що вступають в контакт молот з наковальнею в обмежувачі коливань. Їх взаємодія в цей момент представляє собою доволі складний фізичний процес, що має хвилювий характер, так як елементи ударника, що співударяються являються пружними просторово протяженими тілами. Для інженерних цілей врахування взаємно пружних властивостей молота і наковальні доцільно здійснювати шляхом введення деякого пружного безінерційного елемента, що володіє еквівалентним коефіцієнтом жорсткості $c_{\text{екв}}$, величину котрого можна визначити експериментально способом статичного навантаження елементів ударника.

2.2.1. Загальні рівняння нелінійної динаміки.

В рамках викладеної вище концепції лінійна функція $c(x_1 - x_2)$ в рівняннях системи (2.20) замінюється нелінійною функцією виду []

$$P(x_1, x_2) = \begin{cases} c(x_1 - x_2) & \text{при } x_1 - x_2 < \Delta, \\ c\Delta + (c + c_{\text{екв}})(x_1 - x_2 - \Delta) & \text{при } x_1 - x_2 \geq \Delta, \end{cases} \quad (2.24)$$

де Δ , як було сказано вище, зазор між молотом і наковальнею ударника (див. рис. 2.1). Цей запис відображає той факт, що при малих відносних переміщеннях ($x_1 - x_2 < \Delta$) в роботі приймають участь тільки пружні елементи підвіски корпусу віброзбуджувача.

Контакт молота с наковальнею відбувається в момент часу, коли $x_1 - x_2 = \Delta$.

При подальшому збільшенні різниці $x_1 - x_2$ в роботу вступають ті елементи співударяючихся тіл, пружні властивості котрих характеризуються

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

прийнятим узагальненим коефіцієнтом жорсткості $c_{\text{экв}}$. В цьому випадку (при $x_1 - x_2 \geq \Delta$) сила взаємодії складається з постійної складової $c\Delta$ і змінної – $(c + c_{\text{экв}})(x_1 - x_2 - \Delta)$, причому в цій складовій сумарний коефіцієнт жорсткості рівний $c + c_{\text{экв}}$.

В прийнятих позначеннях (2.24) систему рівнянь (2.20) запишемо у формі

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + 2m_e)\ddot{x}_1 + (b_1 + b_3)\dot{x}_1 + P(x_1, x_2) &= 2m_e e \nu^2 \cos \nu t + b_3 e \nu \sin \nu t, \\ m_2 \ddot{x}_2 + b_2 \dot{x}_2 - P(x_1, x_2) &= N_{cm} - N. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Для зручності подальшого інтегрування рівнянь руху введемо наступні безрозмірні змінні

$$u_1 = \frac{x_1}{\Delta}, u_2 = \frac{x_2}{\Delta}, \tau = \nu t \quad (2.26)$$

і параметри

$$\left. \begin{aligned} \omega_c^2 &= c \frac{m_1 + m_2 + 2m_e}{(m_1 + 2m_e)m_2}, \quad \mu = \frac{\omega}{\nu}, \quad \gamma = \frac{g}{k_1 \omega_c^2 \Delta}, \\ k_1 &= \frac{m_2}{m_1 + m_2 + 2m_e}, \quad k_2 = \frac{2m_e}{m_1 + 2m_e}, \quad \beta = \frac{e}{\Delta}, \quad \lambda = 1 + \frac{c_{\text{экв}}}{c}, \\ \delta_1 &= \frac{b_1}{2\omega_c(m_1 + 2m_e)}, \quad \delta_2 = \frac{b_2}{2\omega_c m_2}, \quad \delta_3 = \frac{b_3}{2\nu m_e}, \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

причому при позначенні безрозмірних коефіцієнтів затухання $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ були використані співвідношення (2.7), відображаючи гіпотезу зовнішнього тертя.

Введемо також безрозмірну нелінійну функцію віброударної взаємодії по аналогії з (2.24), котру при використанні позначень (2.26) і (2.27) запишемо у виді

$$U(u_1, u_2) = \begin{cases} u_1 - u_2 & \text{при } u_1 - u_2 < 1, \\ 1 + \lambda(u_1 - u_2 - 1) & \text{при } u_1 - u_2 \geq 1. \end{cases} \quad (2.28)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Накінець, визначимо безрозмірним співвідношенням функцію реакції ґрунта, що залежить від u_2 , в формі

$$S(u_2) = \frac{N_{cm} - N}{N_{cm}}, \quad (2.29)$$

структура котрої буде зясована пізніше в результаті розгляду особливості взаємодії циліндричної поверхні вальця з ґрунтом.

В позначеннях (2.27), (2.28) і (2.29) систему рівнянь (2.25) нескладно тепер записати у виді, що включає тільки безрозмірні змінні і функції:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 u_1}{d\tau^2} + (2\mu\delta_1 + k_2\delta_3) \frac{du_1}{d\tau} + k_1\mu^2 U(u_1, u_2) &= k_2\beta(\cos \tau + \delta_3 \sin \tau), \\ \frac{d^2 u_2}{d\tau^2} + 2\mu\delta_2 \frac{du_2}{d\tau} + (1 - k_1)\mu^2 U(u_1, u_2) &= \gamma\mu^2 S(u_2), \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

де γ визначається відповідним співвідношенням з позначень (2.2.4).

Деформація ґрунта під дією статичних і динамічних навантажень носить доволі складний характер як в часі, так і в просторі. Значне спрощення опису цього процесу досягається шляхом застосування концепції Прандтля [], суть котрої зводиться до того, що деформація ґрунта вважається пружнопластичною і підчиняється діаграмі, приведеній на рис. 2.2.

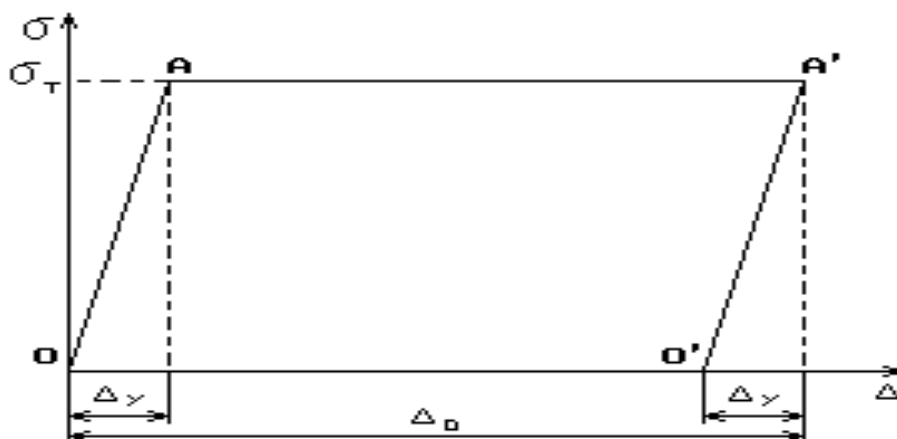


Рисунок 2.2-Діаграма Прандтля для ущільнюваного ґрунту

Тут по горизонтальній осі відкладається величина деформації ґрунта Δ , а по вертикальній осі – величина нормального напруження, що прикладається σ . В області деформацій $\Delta < \Delta_y$ ґрунт веде себе як пружне середовище, що підчиняється звичайному закону Гука (лінія OA), а при досягненні напруження $\sigma = \sigma_T$, де σ_T – напруження текучості матеріала, ґрунт починає проявляти властивості текучості, і подальший ріст напруження не відбувається, але ґрунт претерпіває пластичну деформацію (лінія AA'), наприклад, до величини $\Delta = \Delta_0$. Якщо після досягнення цієї величини деформації відбувається розвантаження, тобто зменшення σ , то деякий час ґрунт знову веде себе як пружне середовище (лінія A'O') до тих пір, поки σ не стане рівним нулю. В цьому випадку загальна величина деформації ґрунту стане рівною $\Delta_0 - \Delta_y$. При наступному циклі “навантаження-розвантаження” відправною точкою становиться точка O' на діаграмі і т.д.

Враховуючи ту немаловажливу обставину, що ґрунт фактично знаходиться в стані пластичної текучості навіть при дії тільки статичних сил (від власної ваги котка), в діаграмі Прандтля знехтуємо ділянками пружної деформації [] і уподобимо ґрунт деякому «текучому» середовищу, такому, що в зоні контакту його з поверхнею вальця котка напруження ґрунту всюди рівне σ_T . Ця свого роду “гідростатична аналогія” являється, так би мовити, робочою гіпотезою, прийнятність якої в подальшому буде оцінена відповідним експериментом.

2.2.2. Квазидинамічний стан котка.

В зв'язку з прийнятою гіпотезою про гідростатичну аналогію розглянемо спочатку квазидинамічне (тобто без врахування вібраційних навантажень) стан котка, валець котрого, обертаючись з кутовою швидкістю ω , переходить

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

з положення O , коли ґрунт ще не претерпів деформації, в положення O' як показано на рис. 2.3.

При цьому валець якби перекочується по деякій неперервній лінії $P'P$, деформуючи (зминаючи) на своєму шляху ґрунт, і, таким чином, лінія $P'P$ являється межею фактично деформованого стану ґрунту.

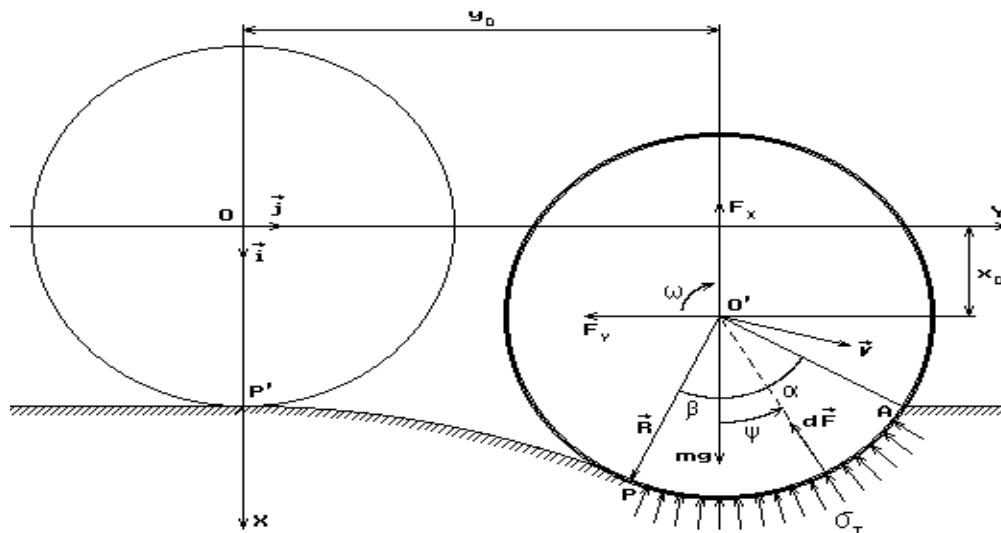


Рисунок 2.3—Квазидинамічне перекочування вальця котка по ґрунту

В зоні контакту вальця з ґрунтом PA , у відповідності з прийнятою концепцією “гідростатичної аналогії”, на валець діє тиск з боку ґрунту, рівний σ_T . В силу цього, загальна реакція ґрунту в проекціях на осі X і Y , позначених на рис. 2.3, буде визначатись виразами:

$$\left. \begin{aligned} F_y &= \int_{-\beta}^{\alpha} \sigma_T R b \sin \phi d\phi = \sigma_T R b (\cos \beta - \cos \alpha), \\ F_x &= \int_{-\beta}^{\alpha} \sigma_T R b \cos \phi d\phi = \sigma_T R b (\sin \beta + \sin \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

де ϕ – поточний кут інтегрування, що відраховується проти годинникової стрілки від позитивного напрямку осі X ; R і b – відповідно радіус і ширина

вальця, так що величина $Rbd\phi$ – елемент площі контакту вальця з ґрунтом, а величина $\sigma_T Rbd\phi = dF$ – елементарна сила реакції ґрунту.

Якщо посередництвом символу x_0 позначити величину зміщення центра вальця по осі X , а посередництвом y_0 – величину зміщення по осі Y , то з допомогою рис. 2.3 можна визначити, що

$$R - x_0 = R \cos \alpha, \quad (2.32)$$

і тоді з використанням (2.32) неважко вирахувати

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)^2}. \quad (2.33)$$

Нехай лінія $P'P$ в координатній системі XY описується деяким рівнянням типу

$$\Phi(x, y) = x - \varphi(y) = 0, \quad (2.34)$$

в котрому $\Phi(x, y)$ і $\varphi(y)$ – підлягаючі визначенню функції. Тоді, очевидно, що з допомогою рівняння (2.34) можна знайти в точці P $\operatorname{tg} \beta = d\varphi / dy$, і при цьому з відомих тригонометричних співвідношень слідує, що

$$\sin \beta = \frac{d\varphi / dy}{\sqrt{1 + (d\varphi / dy)^2}}, \quad \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + (d\varphi / dy)^2}}. \quad (2.35)$$

Знайдемо тепер зв'язок кутової швидкості обертання вальця зі швидкістю його центра O , ґрунтуючись на тому факті, що точка P являється миттєвим центром обертання, завдяки чому має місце векторна рівність []

$$\vec{V} + [\vec{\Omega} \times \vec{R}] = 0, \quad (2.36)$$

де символ $[\vec{\Omega} \times \vec{R}]$ означає векторний добуток відповідних векторів, $\vec{R}$ – радіус-вектор точки P , $\vec{V}$ – вектор швидкості точки O , $\vec{\Omega}$ – вектор кутової швидкості, направленої перпендикулярно площині креслення, тобто в

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

напрямку третьої координатої осі Z (ця вісь на рисунку не позначена). А так як кутова швидкість тут направлена по годинниковій стрілці, то отримаємо

$$\vec{\Omega} = \vec{k}\omega, \quad (2.37)$$

де $\vec{k}$ – одиничний вектор (орт), направлений вздовж осі Z . В свою чергу радіус-вектор $\vec{R}$ можна представити в формі

$$\vec{R} = -\vec{n}R, \quad (2.38)$$

де $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі до поверхні деформованого ґрунту в точці P , причому, як відомо з геометрії [],

$$\vec{n} = \frac{\vec{i}\partial\Phi/\partial x + \vec{j}\partial\Phi/\partial y}{\sqrt{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial y)^2}}, \quad (2.39)$$

де функція Φ задана рівнянням (2.34); $\vec{i}, \vec{j}$ – орти, направлені по відповідним осям X, Y (див. рис. 2.3); частні похідні в (2.39) вчисляються в точці P .

Вектор швидкості $\vec{V}$ задамо очевидним співвідношенням

$$\vec{V} = \vec{i}\frac{dx_0}{dt} + \vec{j}\frac{dy_0}{dt}. \quad (2.40)$$

Підставимо тепер співвідношення (2.37), (2.38), (2.39) і (2.40) в векторну рівність (2.36), в результаті чого отримаємо

$$\vec{i}\frac{dx_0}{dt} + \vec{j}\frac{dy_0}{dt} - \frac{\omega R}{\sqrt{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial y)^2}} \left([\vec{k} \times \vec{i}] \frac{\partial\Phi}{\partial x} + [\vec{k} \times \vec{j}] \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) = 0. \quad (2.41)$$

Відомо, що $[\vec{k} \times \vec{i}] = \vec{j}$, а $[\vec{k} \times \vec{j}] = -\vec{i}$, тому векторна рівність (2.41) приймає вид:

$$\vec{i}\frac{dx_0}{dt} + \vec{j}\frac{dy_0}{dt} - \frac{\omega R}{\sqrt{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial y)^2}} \left(\vec{j}\frac{\partial\Phi}{\partial x} - \vec{i}\frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) = 0,$$

звідки слідує два рівняння

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{-\omega R}{\sqrt{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial y)^2}} \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \quad \frac{dy_0}{dt} = \frac{\omega R}{\sqrt{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial y)^2}} \frac{\partial\Phi}{\partial x}.$$

А так як згідно (2.34)

$$\partial\Phi/\partial x = 1, \quad \partial\Phi/\partial y = -d\varphi/dy,$$

то (2.42) перетворюється до виду

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\omega R}{\sqrt{1 + (\partial\varphi/\partial y)^2}} \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad \frac{dy_0}{dt} = \frac{\omega R}{\sqrt{1 + (\partial\varphi/\partial y)^2}}, \quad (2.42)$$

і в силу визначень (2.35) кінцево отримаємо замість (2.42):

$$\frac{dx_0}{dt} = \omega R \sin \beta, \quad \frac{dy_0}{dt} = \omega R \cos \beta, \quad (2.43)$$

котрі являються рівняннями *неголономных* [], тобто *неінтегруємих* зв'язків при коченні вальця котка по деформованій поверхні ґрунту.

Тепер вже можна записати отримані раніше співвідношення (2.31) для реакцій ґрунту в формі

$$\left. \begin{aligned} F_y &= \sigma_T R b \left[\frac{1}{\omega R} \frac{dy_0}{dt} - \left(1 - \frac{x_0}{R} \right) \right], \\ F_x &= \sigma_T R b \left[\frac{1}{\omega R} \frac{dx_0}{dt} + \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_0}{R} \right)^2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

де $\cos \beta$ і $\sin \beta$ замінені з допомогою співвідношень (2.43), а $\sin \alpha$ і $\cos \alpha$ – з допомогою (2.32) і (2.33).

Далі для з'ясування загального характеру руху котка розглянемо так званий квазидинамічний стан котка, тобто без врахування вібраційних факторів (при умовно ввімкненому віброзбуджувачі). Для запису рівнянь руху, що описують такий стан, визначимо спочатку загальну кінетичну енергію системи у виді

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$T = \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{dx_0}{dt} \right)^2 + \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{dy_0}{dt} \right)^2 + \frac{J}{2} \omega_{\epsilon}^2, \quad (2.45)$$

де $m_{\Pi} = m_1 + m_2 + 2m_{\epsilon}$ – повна маса котка, J – центральний момент інерції вальця, ω_{ϵ} – його кутова швидкість обертання.

З співвідношень (2.43) шляхом виключення $\sin \beta$ і $\cos \beta$ неважко встановити, що

$$\omega^2 = \frac{1}{R^2} \left[\left(\frac{dx_0}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy_0}{dt} \right)^2 \right], \quad (2.46)$$

завдяки чому (2.45) приводиться до виду:

$$T = \frac{1}{2} \left(m_{\Pi} + \frac{J}{R^2} \right) \left[\left(\frac{dx_0}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy_0}{dt} \right)^2 \right]. \quad (2.47)$$

Потенціальна енергія котка в квазидинамічному трактуванні, очевидно, визначається лише гравітаційними силами, тому

$$U = -m_{\Pi} g x_0. \quad (2.48)$$

Рівняння Логранжа, для розглядуваного квазидинамічного стану запишемо як []

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_0} \right) + \frac{\partial U}{\partial x_0} = -F_x, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_0} \right) = F_{\partial \epsilon} - F_y, \quad (2.49)$$

де $F_{\partial \epsilon}$ – движуча сила від зовнішнього джерела, що примушує коток переміщуватися в горизонтальному напрямку.

Підстановка (2.47) і (2.48) в (2.49) в підсумку дає:

$$\left(m_{\Pi} + \frac{J}{R^2} \right) \frac{d^2 x_0}{dt^2} + F_x = m_{\Pi} g, \quad \left(m_{\Pi} + \frac{J}{R^2} \right) \frac{d^2 y_0}{dt^2} + F_y = F_{\partial \epsilon},$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

або з врахуванням виразів (2.44)

$$\left. \begin{aligned} \left(m_{II} + \frac{J}{R^2}\right) \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \sigma_T R b \left[\frac{1}{\omega R} \frac{dx_0}{dt} + \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)^2} \right] &= m_{II} g, \\ \left(m_{II} + \frac{J}{R^2}\right) \frac{d^2 y_0}{dt^2} + \sigma_T R b \left[\frac{1}{\omega R} \frac{dy_0}{dt} - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right) \right] &= F_{\partial \delta}, \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

де ω визначається співвідношенням (2.46), завдяки чому здійснюється взаємозв'язок двох рівнянь в (2.50).

Стаціонарне рішення шукаємо при умові рівності нулю інерціальних сил, для чого вважаємо в (2.50) $\ddot{x}_0 \equiv 0$, $\ddot{y}_0 \equiv 0$.

Окрім того, вважаємо, що в стаціонарному русі $\dot{x}_0 \equiv 0$. З врахуванням цього тотожства з допомогою (2.46) встановлюємо, що $\omega R = dy_0 / dt$, і тоді (2.50) приймає вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T R b \sqrt{1 - \left(1 - x_0^* / R\right)^2} &= m_{II} g, \\ \sigma_T b x_0^* &= F_{\partial \delta}, \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

де x_0^* відрізняється від x_0 і означає шукане стаціонарне рішення, що являється, по суті справи, величиною зминання ґрунту. Цю величину знайдемо з першого рівняння системи (2.51) в формі

$$x_0^* = R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{m_{II} g}{\sigma_T R b} \right)^2} \right), \quad (2.52)$$

і у випадку, коли вага котка $m_{II} g$ значно менше величини $\sigma_T R b$, приближено має місце співвідношення

$$x_0^* = \frac{1}{2R} \left(\frac{m_{II} g}{\sigma_T b} \right)^2. \quad (2.53)$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Замітимо, що при $x_0 = x_0^*$, де x_0^* визначається по формулі (2.52), в силу (2.33) отримаємо

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_0^*}{R}\right)^2} = \frac{m_{II} g}{\sigma_T R b},$$

а так як в стаціонарному квазидинамічному русі кут $\beta = 0$, то проекція хорди AP на горизонтальну вісь (див. рис. 2.3) знайдеться як

$$L = R \sin \alpha = m_{II} g / (\sigma_T b).$$

Тоді при заданій швидкості котка V час знаходження кожної точки ґрунту, що зминається під навантаженням визначається виразом

$$T_{нагр} = \frac{L}{V} = \frac{m_{II} g}{V \sigma_T b}. \quad (2.54)$$

З допомогою другого рівняння системи (2.51) з використанням виразу (2.53) знаходимо величину движучого зусилля

$$F_{\partial\theta} = \frac{(m_{II} g)^2}{2 \sigma_T R b}. \quad (2.55)$$

Ісотним є та обставина, що якщо надати можливість вальцю вільно «занурюватися» в ґрунт при відсутності його обертання, тобто при $\omega = 0$, коли $F_{\partial\theta} = 0$, то в силу симетрії реакцій на валець з боку ґрунту має місце рівність $\alpha = \beta$, і друге з співвідношень (2.44) запишеться у формі

$$F_x = 2 \sigma_T R b \sin \alpha.$$

А так як в цьому випадку $F_x = m_{II} g$, то, скориставшись формулою (2.33), знайдемо замість (2.53)

$$x_0^{**} = R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{m_{II} g}{2 \sigma_T R b} \right)^2} \right) \approx \frac{1}{4R} \left(\frac{m_{II} g}{\sigma_T b} \right)^2.$$

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Таким чином, при вільному зануренні вальця величина зминання ґрунту x_0^{**} оказується приблизно в два рази менше в порівнянні з x_0^* , отримуваний при протяжці вальця в горизонтальному напрямку.

Звернемося тепер до вихідної системи рівнянь квазидинамічного стану котка (2.50) і запишемо цю систему в безрозмірній формі, для чого введемо нові динамічні змінні і «безрозмірний час» у відповідності з формулами

$$u = \frac{x_0}{x_0^*}, \quad v = \frac{y_0}{x_0^*}, \quad \tau = t \sqrt{\left(\frac{g}{R} \frac{m_{II} R^2}{m_{II} R^2 + J} \right) \frac{\varepsilon}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}}, \quad (2.56)$$

де безрозмірний параметр ε визначається виразом

$$\varepsilon = m_{II} g / (\sigma_T R b). \quad (2.57)$$

З врахуванням (2.56) і з позначенням (2.57) система рівнянь (2.50) прийме зручний для численного інтегрування вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 u}{d\tau^2} + \sqrt{1 - (1 - u\zeta)^2} + \frac{1}{\xi(\tau)} \frac{du}{d\tau} &= \varepsilon, \\ \frac{d^2 v}{d\tau^2} + \frac{1}{\xi(\tau)} \frac{dv}{d\tau} - 1 + u\zeta &= \zeta, \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

де додатково для краткості запису позначено

$$\zeta = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}, \quad \xi(\tau) = \sqrt{\left(\frac{du}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dv}{d\tau} \right)^2}.$$

Друге рівняння системи (2.58) записано при умові, що $F_{\partial\theta}$ визначається формулою (2.55) як для стаціонарного руху.

Інтегрування системи рівнянь (2.58) виконувалось численим методом, і деякі результати представлені на рис. 2.4, а, б.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

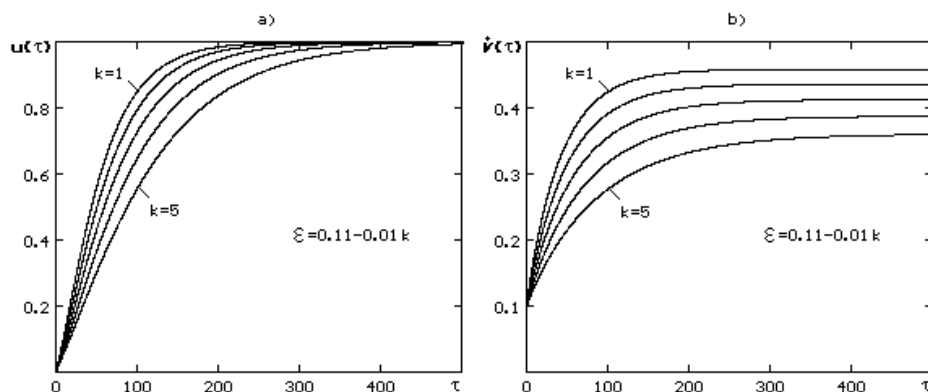


Рисунок 2.4—Деякі результати інтегрування рівнянь

Так, на рис. 2.4, а, показано сімейство функцій $u(\tau)$ в залежності від величини параметра ε . Асимптотичне прямування кожної з цих функцій до одиниці при зростанні τ свідчить про те, що в квазидинамічному випадку переміщення вальця у вертикальному напрямку безперервно збільшується і поступово приближається до його стаціонарного значення x_0^* , що визначається формулами (2.52) або (2.53).

З рис. 2.4 а) видно також, що при зменшенні параметра ε , що визначається формулою (2.57), тобто при зменшенні, наприклад, ваги котка при незмінних інших параметрах, процес досягнення стаціонарної величини зминання ґрунту відбувається на протязі більш тривалого часу, ніж у випадках великих значень ε . В той же час, збільшення параметра ε , починаючи зі значення $\varepsilon = 0,2$, не приводить до суттєвого ефекта, і по цій причині нерівності

$$0,1 < \frac{m_{\Pi} g}{\sigma_T R b} < 0,2 \quad (2.59)$$

можуть служити для обґрунтованого вибору таких важливих параметрів котка, як його маса, радіус і ширина вальця.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

На рис. 2.4 б) зображено сімейство функцій $\dot{v}(\tau)$ (тут точка означає похідну по τ), інтерпретуючих швидкість горизонтального переміщення котка в залежності від параметра ε . Звідси видно, що, через деякий час, швидкість котка стає практично постійною, і чим менше величина параметра ε , тим більше необхідно часу для виходу на постійну стаціонарну швидкість. Позначимо цю граничну швидкість символом V_0^* .

З допомогою позначень (2.56) зв'язок $\dot{v}(\tau)$ з реальною швидкістю $\dot{y}(t)$ (тут точка означає похідну по t) встановлюється в результаті наступних перетворень

$$\frac{dy}{dt} = x_0^* \frac{dv}{d\tau} \frac{d\tau}{dt} = \left[\dot{v}(\tau) \sqrt{\frac{\varepsilon}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}} \right] x_0^* \sqrt{\frac{g}{R} \frac{m_{II} R^2}{m_{II} R^2 + J}}.$$

Вираз, заключений тут в квадратні дужки, при $\tau \rightarrow \infty$ є практично незалежним від ε , в чому можна впевнитися з допомогою представлених на рис. 2.4 б) графіків, тобто представляє собою деяку константу, причому ця константа ≈ 2 , як следує з обчислень.

Таким чином, для стаціонарної швидкості руху приходимо до наступного виразу

$$V_0^* = 2x_0^* \sqrt{\frac{g}{R} \frac{m_{II} R^2}{m_{II} R^2 + J}},$$

а після підстановки сюди (2.53) кінцево отримаємо

$$V_0^* = \left(\frac{m_{II} g}{\sigma_T b} \right)^2 \sqrt{\frac{g}{R} \frac{m_{II}}{m_{II} R^2 + J}}. \quad (2.60)$$

По суті справи, $V_0^* = V_{\min}$ – є та мінімальна швидкість, менше котрої величина фактичного квазидинамічного зминання ґрунту є меншою теоретично очікуваної величини x_0^* . Тому фактична експлуатаційна

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

швидкість V горизонтального переміщення котка повинна задовольняти умові $V \geq V_0^*$.

При визначенні мінімальної швидкості котка по формулі (2.60), час знаходження кожної точки ґрунта, що зминається під навантаженням знайдемо при допомозі (2.54) в наступному виді

$$T_{нагр} = \frac{\sigma_T b}{m_{II} g} \sqrt{\frac{R}{g} \cdot \frac{m_{II} R^2 + J}{m_{II}}}. \quad (2.61)$$

Формула (2.60) для мінімальної величини стаціонарної швидкості горизонтального руху котка і вираз (2.55) для рухаючого зусилля дозволяють визначити потрібну для переміщення мінімальну потужність привода котка:

$$N_{np}^{min} = F_{\partial\phi} V_0^* = \frac{(m_{II} g)^4}{2R(\sigma_T b)^3} \sqrt{\frac{g}{R} \frac{m_{II}}{m_{II} R^2 + J}},$$

а для конкретно прийнятої швидкості V згідно умови $V \geq V_0^*$ –

$$N_{np} = F_{\partial\phi} V = \frac{(m_{II} g)^2}{2\sigma_T R b} V. \quad (2.62)$$

Формула (2.62) може бути покладена в основу інженерної методики розрахунку вібраційного котка.

2.2.3. Нелінійна функція реакції ґрунту.

Отримані рішення рівнянь квазидинамічного стану котка дозволяють приступити до явного визначення функції $S(u_2)$, що входить в систему рівнянь (2.30) і позначеної співвідношенням (2.29).

Вираз для реакції N , очевидно, можна отримати з допомогою першого з співвідношень (2.51). Дійсно, якщо сюди замість $m_{II} g = N_{cm}$ підставити

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

фактичну динамічне навантаження N , то в цьому випадку необхідно, писати з врахуванням позначень (2.26) замість x_0^* вираз $x_0^* + u_2 \Delta$, тобто маємо

$$N = \sigma_T R b \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_0^* + u_2 \Delta}{R}\right)^2}.$$

Звідси з врахуванням виразу (2.52) для x_0^* і позначення (2.57), знайдемо після елементарних перетворень:

$$\frac{N}{mg} = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{\varepsilon^2 + 2\beta u_2 \sqrt{1 - \varepsilon^2} - (\beta u_2)^2}.$$

Підкорінний вираз в цьому співвідношенні перетворюється в нуль при $u_2 = -x_0^* \Delta$, і при подальшому зменшенні u_2 реакція N стає рівною нулю, тобто в цьому випадку відбувається «підплигування» котка (його відрив від покриття). Відповідно, в загальному випадку

$$\frac{N}{m_{II} g} = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{\varepsilon^2 + 2\beta u_2 \sqrt{1 - \varepsilon^2} - (\beta u_2)^2} & \text{при } u_2 > -x_0^* / \Delta, \\ 0 & \text{при } u_2 \leq -x_0^* / \Delta. \end{cases} \quad (2.63)$$

Підставляючи це співвідношення в (2.29), отримаємо

$$S(u_2) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{\varepsilon^2 + 2\beta u_2 \sqrt{1 - \varepsilon^2} - (\beta u_2)^2} & \text{при } u_2 > -x_0^* / \Delta, \\ 1 & \text{при } u_2 \leq -x_0^* / \Delta. \end{cases} \quad (2.64)$$

И так, система рівнянь (2.30) з нелінійними функціями (2.28) і (2.64) представляє собою математичну модель вібраційного котка [], доступну для моделювання численими методами.

На рис. 2.5 отримані численим способом рішення представлені у виді двох графіків відносних переміщень віброзбуджувача u_1 і корпусу котка $u_2 + x_0^* / \Delta$, причому для скорочення запису на рисунку ця функція позначена

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

як-і раніше як u_2 . Побудова виконана при наступних величинах безрозмірних параметрів:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 0,00875, \quad k_1 = 0,926, \quad k_2 = 0,5, \quad \varepsilon = 0,1, \\ \beta &= 3,75, \quad \lambda = 45, \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,1, \end{aligned} \right\} \quad (2.65)$$

причому параметр, що характеризує частотні властивості в цілому котка $\omega_c = 12,38 \text{ Гц}$, а частота зовнішнього збудження $\nu = 3 \text{ Гц}$.

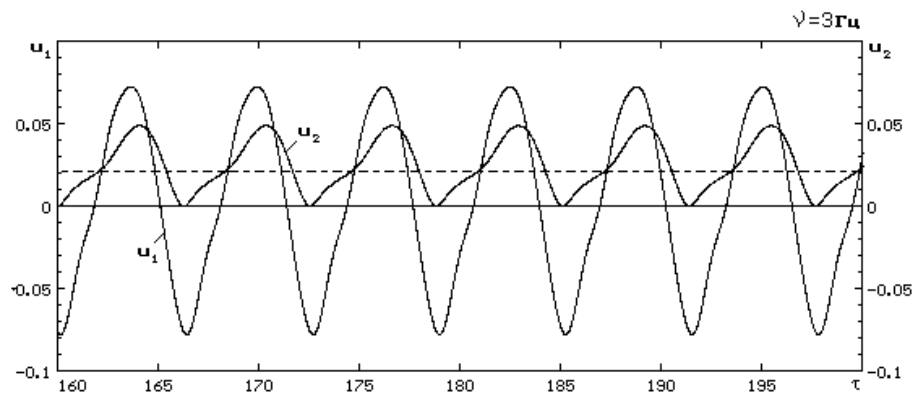


Рисунок 2.5—Встановившіся коливання віброзбуджувача (u_1) і корпусу котка (u_2) на

З графіків видно, що коливання корпусу котка, а значить і власне вальця, відбуваються в даному випадку без його відривання від ґрунту. Динамічне змінання ґрунту приблизно складає удвоєну величину квазидинамічного змінання x_0^* (на рисунку його величина позначена пунктирною лінією). Коливання віброзбуджувача і корпусу котка у встановившомуся (стаціонарному) режимі являються суворо періодичними з частотою зовнішнього збудження $\nu = 3 \text{ Гц}$. В даному випадку віброударний пристрій не приймає участь в колевальному процесі, із-за порівняльно невеликих відносних переміщень $u_1 - u_2$.

На рис. 2.6 для тих же параметрів котка приведені графіки відносних переміщень віброзбуджувача і корпусу котка, але при частоті зовнішнього збудження $\nu = 10 \text{ Гц}$.

З представлених графіків видно, що коливання корпусу котка відбуваються з його відривом від ґрунту. Динамічне зминання ґрунту складає приблизно п'ятикратну величину квазидинамічного зминання x_0^* . В даному випадку молот і наковальня (обмежувач коливань віброзбуджувача) активно взаємодіє один з одним.

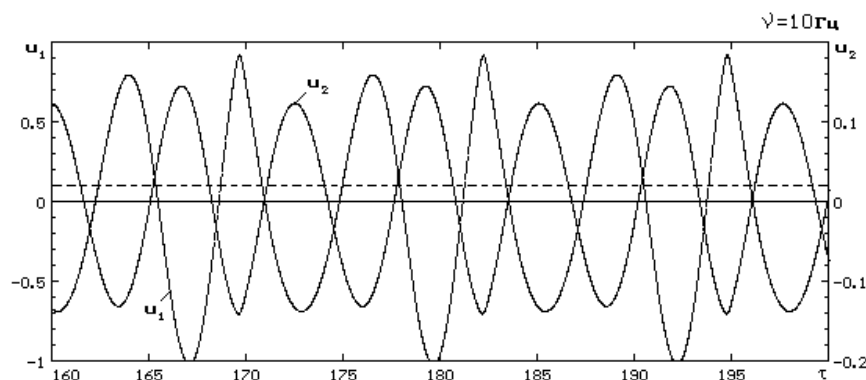


Рисунок 2.6—Встановившіся коливання віброзбуджувача (u_1) і корпусу котка (u_2) на

частоті збудження 10 Гц

Коливання віброзбуджувача і корпусу котка в режимі, що установився являються суворо періодичними з частотою рівною половині частоти зовнішнього збудження $\nu / 2 = 5 \text{ Гц}$, так як в цьому випадку має місце явище подвоєння *періоду коливань*, що зв'язано з проявами особих так званих *біфуркаційних* властивостей розглядуваної нелінійної механічної системи [].

Взагалі, термін “біфуркація”, що в перекладі еквівалентно слову “роздвоєння”, в механіці означає «придбання» механічною системою яких-небудь нових властивостей (стану стійкості, характеру руху) при зміні яких-небудь параметрів цієї системи. Частіше всього придбані нові властивості як раз і носять характер «роздвоєння» чого-небудь, наприклад, частоти коливань.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Стосовно до розглядуваної механічної системи, біфуркація виявляється в явищі виникнення вимушених коливань з удвоєним періодом при деяких значеннях частоти збуджуючої сили, що можливо тільки в нелінійних системах. При цьому біфуркація виникає не у всій області технічно допустимих частот, а у відносно нешироких локально розташованих діапазонах. Подвоєння періода вимушених установившихся коливань характерно суперпозицією двох гармонічних складових з частотами ν і $\nu/2$, кожна з котрих має різні амплітуди. На практиці це приводить до виникнення нерівностей на поверхні ущільнюваного покриття, і по цій причині необхідно достовірно знати, на яких частотах зовнішнього збудження виникають біфуркаційні явища, з тим, щоб виключити режими вібрації з двома різними амплітудами.

2.3. Амплітудно-частотні характеристики і фазові портрети

Амплітудно-частотні характеристики (для цього поняття є загальноприйняте скорочення – АЧХ) будь-якої коливальної механічної системи, що знаходиться під впливом зовнішнього періодичного збудження, як і в розглядуваній моделі, грають фундаментальну роль, насамперед, при вивченні властивостей самої досліджуваної системи, а потім ці характеристики служать в якості робочого документу вже при експлуатації об'єкта. Як правило, АЧХ будуються в координатах «частота зовнішнього збудження – амплітуда вимушених коливань» [].

Залежність амплітуд коливань від частоти зовнішнього збудження, представлені на рис. 2.7.

Тут a_1 – амплітуда вимушених коливань віброзбуджувача, a_2 – амплітуда вимушених коливань корпусу котка [обидві вони віднесені до параметра Δ , причому Δ , як було сказано вище, – зазор між співударяючимися молотом і наковальнею ударника (див. рис. 2.1)].

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

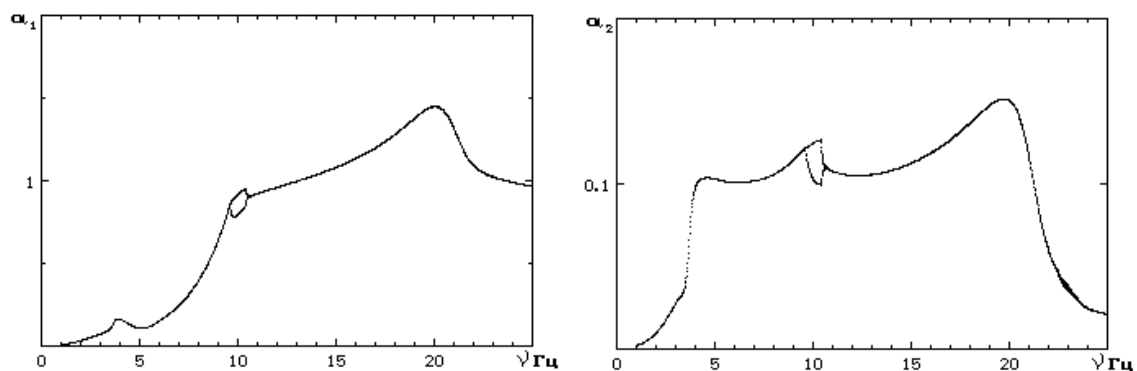


Рисунок 2.7 – АЧХ віброзбуджувача (a_1) і корпусу котка (a_2) при коефіцієнтах затухання $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,1$

Для повноти уявлень і для практичних цілей на рис. 2.8 зображена АЧХ відносних переміщень віброзбуджувача і корпусу котка, позначених символом Δa .

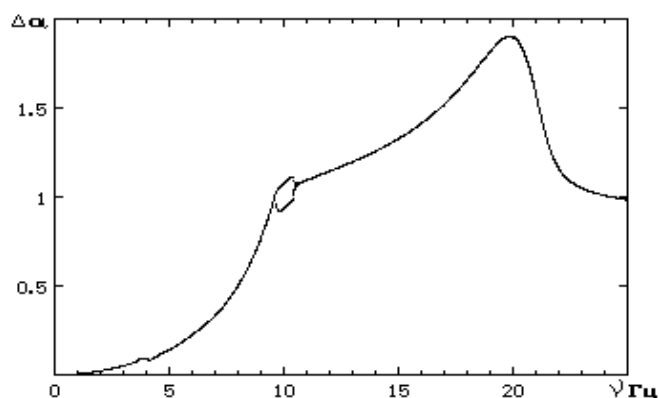


Рисунок 2.8 – АЧХ відносних переміщень

З представлених на цих рисунках залежностей видно, що явище біфуркації має місце на частотах ν приблизно від 9,4 до 10,5 Гц. Перший “пік” амплітуд відповідає $\nu \approx 4 \text{ Гц}$, що являється резонансною частотою, обумовленою раніше прийнятою характеристикою ущільнюваного ґрунту, оцінюваного параметром ε [див. вихідні дані (2.64)]. Другий “пік” амплітуд відповідає $\nu \approx 20 \text{ Гц}$, що являється резонансною частотою, обумовленою

прийнятими параметрами віброударного пристрою. Ця частота приблизено відповідає, судячи по рівнянням системи (2.30), величині $2\omega\sqrt{k_1}/(2\pi)$, тобто такого роду резонанс має місце в області подвоєної власної парціальної частоти. Ця особливість розглядуваної системи нагадує явище параметричного резонансу, котрий, як відомо, настає на частоті зовнішнього збудження, рівної подвоєній власній частоті.

Необхідно замітити, що приведені на рис. 2.7 і 2.8 АЧХ побудовані при досить «загрублених» коефіцієнтах затухань, і по цій причині фактична резонансна частота в порівнянні з розрахунковою по приведеній формулі “здвинута” в сторону менших величин, що являється характерною властивістю взагалі для нелінійних систем.

Величина коефіцієнтів затухання впливає на АЧХ не стільки в кількісному, скільки в якісному відношенні. Це ілюструє приведена на рис. 2.9 амплітудно-частотна характеристика віброзбуджувача, побудована при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,02$.

Якщо цю характеристику порівняти з відповідною АЧХ, зображеною на рис. 2.7, то, насамперед, помітно істотне збільшення амплітуд коливань при зменшенні коефіцієнтів затухання, особливо на резонансній частоті, котра в даному випадку приблизно рівна 21 Гц . Тут, також як і на рис. 2.7, близько частоти 10 Гц має місце біфуркація, тобто подвоєння періоду вимушених коливань. Такого ж роду явище спостерігається близько частоти 6 Гц .

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

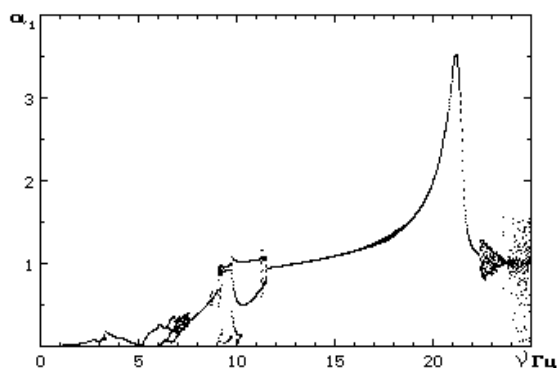


Рисунок 2.9 – АЧХ вібробуджувача при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,02$

Але самою важливою особливістю, віднайденою на рис. 2.9 являється придбання системою зовсім нових фізичних властивостей, що заключаються в виникненні при деяких значеннях частоти збудження ν *хаотичних коливань*. При з'явленні хаоса не може бути стаціонарного руху, амплітуди коливань неупорядочені, і в цілому система веде себе подібно системі з випадковими змущеннями, хоча по своїй суті розглядуваний механічний об'єкт являється досить детермінованим в рамках сформульованої задачі.

Предметом вивчення спеціального розділа сучасної класичної механіки, що називається “хаотичною динамікою”, як раз і являються хаотичні коливання нелінійних і параметричних систем []. Останнім часом в цій області отримано ряд фундаментальних результатів, що дозволяють розпізнавати істинні хаотичні рухи серед можливих так називаємих квазіперіодичних коливань, встановлені ознаки настання хаосу, з'ясований зв'язок хаотичних коливань з біфуркаційними властивостями системи. В даному дослідженні зупинимося лише на констатації можливості хаотичних коливань в розглядуваній машині з метою відбудови її параметрів від цього небажаного явища.

Області хаотичного руху на рис. 2.9 означені «тіньовими» зонами з неупорядоченим розбросом точок. Таких зон декілька: в поблизу $\nu = 6 - 7 \text{ Гц}$, $\nu = 9,5 \text{ Гц}$, $\nu = 10,5 \text{ Гц}$. Особливо широкою зоною хаоса являється зарезонансна область при $\nu > 22 \text{ Гц}$.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Ясно, що зони хаотичних коливань непридатні для практичного використання, як і зони з біфуркаціями, так як при цьому обов'язкове виникнення нерівностей на поверхні ущільнюваного покриття. По цій причині необхідно достовірно знати, на яких частотах зовнішнього збудження виникає хаос, для того, щоб виключити режими вібрації з неупорядкованими амплітудами.

Область резонанса також слід виключити з розгляду, так як в цьому випадку мають місце дуже інтенсивні коливання елементів механічної системи, здатні визвати руйнування, в першу чергу, віброударного пристрою і відповідно, машини в цілому. Судячи з діаграми рис. 2.9, єдиний прийнятний діапазон частот зовнішнього збудження знаходиться в межах $\nu = 12 \dots 18 \text{ Гц}$.

Цей висновок справедливий для системи з прийнятими конкретними параметрами котка і ґрунту, і може бути геть іншим при можливих варіаціях вихідних параметрів. В зв'язку з цим, особе значення для практики представляють створені інтерактивні програмні модулі імітаційного моделювання динамічних станів вібраційного котка в рамках розробленої математичної моделі, що дозволяють ще на стадії проектування з врахуванням раніше встановлених фізико-механічних параметрів відвальних порід або інших матеріалів визначити необхідні параметри системи.

Наглядне уявлення про характер динамічних процесів в розглядуваній механічній системі дає так званий *фазовий портрет*, що будується в координатах динамічних змінних, тобто в системі «переміщення-швидкість». В цьому випадку область зміни динамічних змінних, тобто вся координатна площина «переміщення-швидкість», називається, як відомо, *фазовою площиною*. При неперервній зміні переміщень і швидкості на фазовій площині залишається «слід», котрий називається *фазовою траєкторією* []. Саме фазова траєкторія і утворює те, що прийнято називати фазовим портретом.

Фазовий портрет дає не тільки наглядне уявлення про рух, але і вказує на тенденцію в поведінці системи при достатньо тривалому часу процесу. Якщо

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

коливання з часом приймають стаціонарний характер, то фазова траєкторія, в кінці кінців, «вийде» на стійку замкнуту орбіту, котра частіше всього представляє собою еліпс (як для лінійних систем).

Але в нелінійних системах, до яких відноситься коток, замкнута орбіта (тобто стаціонарна фазова траєкторія) нерідко має вид доволі складної кривої [1].

Так, на рис. 2.10 представлені два фазових портрети віброзбуджувача при частотах збудження $\nu = 8 \Gamma_{\text{ц}}$ і $\nu = 10 \Gamma_{\text{ц}}$. Звідси видно, що при $\nu = 8 \Gamma_{\text{ц}}$ віброзбуджувач виконує гармонійні коливання з симетричною амплітудою.

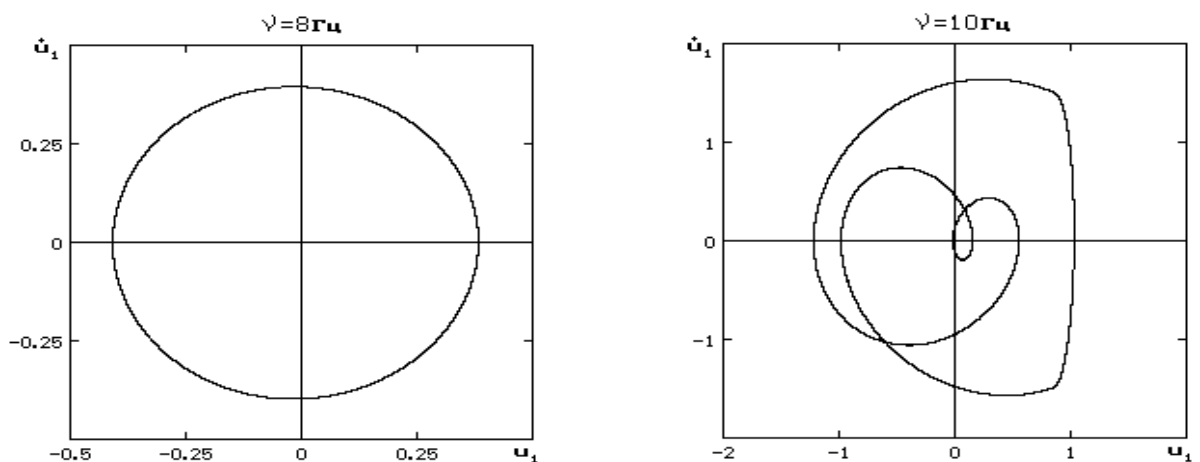


Рисунок 2.10 – Стаціонарні фазові траєкторії віброзбуджувача при різних частотах зовнішнього збудження.

Судячи з діаграми рис. 2.9, доволі малі відхилення від частоти $\nu = 8 \Gamma_{\text{ц}}$ вправо або вліво «нізвергають» систему в область хаотичного руху. По цій причині вряд чи доцільно вибирати дану частоту в якості робочої, так як неізбіжні малі відхилення параметрів механічної частини котка і фізичних властивостей ґрунту можуть стати причиною нестійкої і неефективної роботи.

На частоті $\nu = 10 \Gamma_{\text{ц}}$, котрій відповідає область біфуркації, про що говорилось вище, коливання носять доволі складний полігармонічний характер с найменшою частотою $\nu/2$. При цьому на періоді цієї частоти переміщення віброзбуджувача декілька раз приймають екстремальні значення. Такі явища

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

вимушених коливань нелінійних систем називаються *множественною бифуркацією*.

Звертає не себе увагу та обставина, що на частоті $\nu = 10 \text{ Гц}$ в роботі приймає участь віброударний пристрій, про що свідчить наявність в фазовій траєкторії пологої вертикально-орієнтованої ділянки (справа на фазовому портреті). При русі на цьому відрізку траєкторії незначна зміна координати (u_1) визиває майже скачкоподібну зміну швидкості ($\dot{u}_1$), що обумовлено особливостями взаємодії молота і наковальні при ударі.

Геть по іншому веде себе віброзбуджувач на частотах, що відповідають хаотичним коливанням. Так, з рис. 2.11, де представлені два фазових портрети при частотах збудження $\nu = 7 \text{ Гц}$ і $\nu = 27 \text{ Гц}$, видно, що в характері руху неможливо віднайти упорядкованість, і такого рода коливання продовжуються скільки завгодно довго.

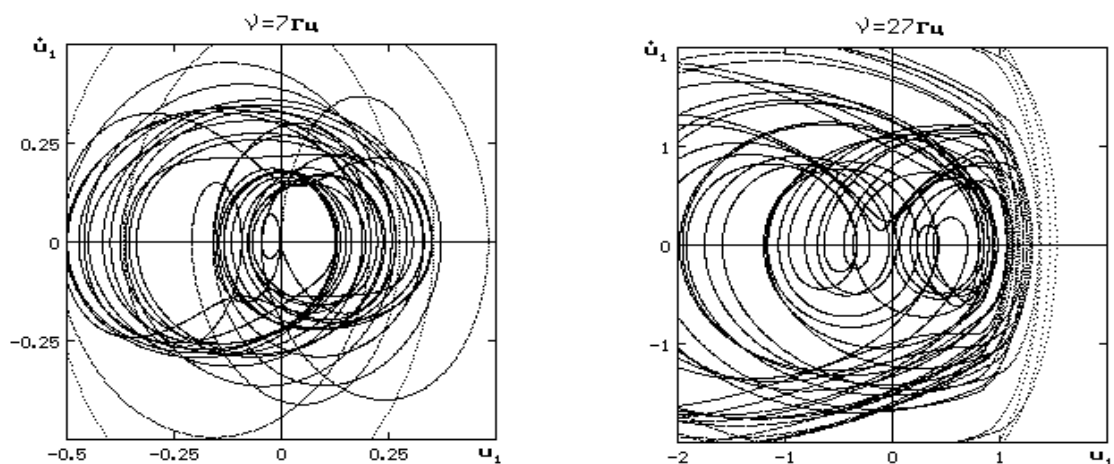


Рисунок 2.11 – Хаотичні коливання віброзбуджувача при різноманітних частотах зовнішнього збудження

На рис. 2.12 в якості прикладу зображені розгортки по часу двох хаотичних процесів руху віброзбуджувача і корпусу котка. Повна відсутність періодичності цих процесів робить їх подібними випадковим коливанням.

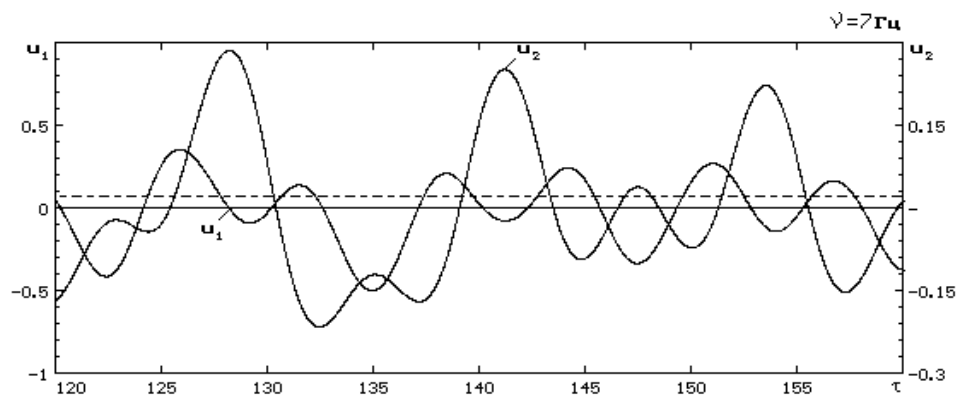


Рисунок 2.12 – Хаотичні коливання віброзбуджувача (u_1) і корпусу котка (u_2) на частоті збудження 7 Гц.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 3

ПРИЗНАЧЕННЯ, ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА І КОНСТРУКЦІЯ ДОРОЖНЬОГО КОТКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ

Самохідний дорожній коток комбінованої дії ДУ-52 (рис. 3.1) призначений для ущільнення відсипаних і попередньо спланованих шарів ґрунту і матеріалів дорожніх основ.

Технічна характеристика самохідного дорожнього котка ДУ-52 представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика самохідного дорожнього котка ДУ-52.

Найменування параметра	Значення
1	2
Маса, т	16
Робочі органи Ведучі ведений	<u>пневмокошеса</u> гладкий металевий <u>віброналец</u>
Ширина смуги, що <u>ущільнюється</u> , м	2,0
Швидкість руху, км/год	
З <u>ввімкненим віброзбуджувачем</u>	0 – 5,4
З <u>вимкненим віброзбуджувачем</u>	0 – 10,8
<u>Пневмо кошеса</u> Кількість, шт Розмір Внутрішній тиск, МПа	4 12,00 x 2,0 0,3 - 0,8
<u>Валец вібраційний</u> Діаметр, мм Ширина, мм Частота обертання <u>вала віброзбуджувача</u> , хв ⁻¹ Збуджуюча сила, <u>віброзбуджувача</u> , кН	1600 2000 1600 150

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 3.1.

1	2
Привід <u>Пневмоколіс</u> <u>Вала віброзбуджувача</u>	гідростатичний гідростатичний
Керування поворотом	гідростатичний
Радіус повороту по внутрішньому сліду, м	3,9
База, мм	3100
Габаритні розміри, мм	
Довжина	5700
Ширина	2420
Висота	3400
Двигун Марка Тип	ЯАЗ-М206А двотактний дизель
Номінальна потужність, кВт	110
Число обертів при номінальній потужності, хв ⁻¹	1800
Питома витрата палива при номінальній потужності, г/кВт год	245
Пуск двигуна	від електростартера
Редуктор <u>роздаточний</u>	<u>циліндричний косозубий</u>
Редуктор бортовий	циліндричний
Тип гальма	треступінчастий
Номінальна напруга <u>електроустат-</u> <u>кування, В</u>	24

Коток ДУ – 52 складається з трьох агрегатів: пневмоколісного вальця з чотирьох шин, силового агрегату і вібраційного вальця з металевою обичайкою.

Чотири пневмоколеса є робочими органами статистичної дії, що ущільнюють, а металевий твердий валець, у якому змонтований віброзбуджувач – є ущільнюючим робочим органом вібраційної дії. Послідовний вплив на матеріал, що ущільнюється, вібраційним і статичним способом збільшує ефективність ущільнення. Крім того, завдяки невеликому 3,1м відстані між віссю пневмоколес і віссю вібровальця, робочі органи статичної дії (пневмоколеса) виявляються в зоні, що знаходиться під дією вібраційного

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

робочого органа (вібровальця), що також збільшує ефективність роботи машини.

Рама силового агрегату і вібровальця зчленовані між собою шарніром з вертикальною віссю, розташованою по середині між віссю пневмоколес і вібровальця. Таке розміщення шарніра зчленування дозволяє зменшити радіус повороту в порівнянні з машиною, оснащеною віссю повороту, розміщеною у вертикальній площині одного з робочих органів, що перекочуються. Таке розміщення шарніра повороту забезпечує на прямолінійних ділянках прохід обох осей машини «слід» у «слід», що є важливим достоїнством для машини, що ущільнює.

На коткі застосований гідростатичний привод ведучих пневмоколес, вібробуджувача і рульового керування. Такий вид привода дозволяє порівняно просто виконувати привід робочих органів, розташованих на різних рамах, що повертаються відносно один одного. Застосування регульованих насосів дозволяє забезпечити безступінчасту зміну швидкості переміщення котка і його плавне реверсування.

Коток має механізм керування електроустаткуванням, пристрій для очищення вальця і кабіну.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатність людини в процесі праці.

Задача охорони праці – звести до мінімальної ймовірності враження або захворювання працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

В додатку А наведені основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, інженерні рішення по обмеженню впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на обслуговуючий персонал. Виконані розрахунки стійкості дорожнього котка, розрахунок освітленості робочої зони, Заходи щодо інженерних засобів по захисту від вібрації та виконано розрахунок запобіжного клапана гідросистеми. Приділена увага заходам щодо пожежної безпеки при роботі котка, заходам щодо обслуговування та ремонту котка.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Розроблена класифікація ущільнюючих машин за функціональними і структурними ознаками дає впорядковану уяву про тенденції прогресу в даній галузі і дозволяє приймати науково-обґрунтовані рішення при розробці зразків нової техніки і технології.

2. Найбільш ефективною машиною для ущільнення відвальних порід є самохідна колісна установка з причіпним котком, робочий орган котрого представляє собою один металевий валець з вбудованим або приєднаним до нього інерційним віброзбудником направленої дії;

3. Вібраційний коток представляє собою чотирьохмасову нелінійну механічну систему, що включає масу віброзбудника з двома дебалансами, що обертаються назустріч одне-одному і приведену масу корпусу котка з вальцем.

4. Пружно-пластична модель Прандтля, що застосовується стосовно до деформаційному стану ущільнюваного середовища з врахуванням кінематичних особливостей кочення циліндричного вальця по середовищу, що зминається дозволила отримати замкнену систему диференціальних рівнянь взаємодії вальця з середовищем в динамічному режимі.

5. Отримані амплітудно-частотні характеристики вібраційного котка дозволили виявити області резонансних станів по шкалі частоти вібраційного збудження, області біфуркаційних станів (подвоєння періоду коливань вальця), області хаотичних (неупорядкованих) коливань.

6. Розроблені заходи з охорони праці та техніки безпеки при роботі котка.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

CONCLUSIONS

1. The developed classification of compacting machines according to functional and structural characteristics gives an orderly idea of the trends of progress in this field and allows making scientifically based decisions when developing samples of new equipment and technology.

2. The most effective machine for compacting waste rock is a self-propelled wheeled unit with a trailed roller, the working body of which is one metal roller with a built-in or attached to it inertial vibration exciter of directional action.

3. The vibrating roller is a four-mass non-linear mechanical system, which includes the mass of the vibrator with two imbalances rotating towards each other and the reduced mass of the body of the roller with the roller.

4. Prandtl's elastic-plastic model, applied to the deformation state of the compacted medium, taking into account the kinematic features of rolling of a cylindrical cylinder on a crumpling medium, made it possible to obtain a closed system of differential equations of the interaction of the cylinder with the medium in the dynamic mode.

5. The obtained amplitude-frequency characteristics of the vibrating roller made it possible to identify areas of resonant states on the frequency scale of vibration excitation, areas of bifurcation states (doubling of the period of oscillations of the roller), areas of chaotic (disordered) oscillations.

6. Developed measures for labor protection and safety techniques during the operation of the rolling mill.

					КМР 2213301 ПЗ	Архив
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хмара Л.А., Колесник М.П., Станевський В.П. Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин. – К.: Будівельник, 1992. – 152 с.
2. Машина для земляних робіт: Підручник / Л.А. Хмара, С.В.Кравець, М.П.Скоблюк та ін.; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н., проф. С.В. Кравця. – Х.: ХНАДУ, 2014 – 548с.
3. Баладінський В.Л. Машина для земляних робіт: Підручник / В.Л. Баладінський, О.М. Гаркавенко, С.В. Каравець, І.В. Русан, А.В.Фомін – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – 228 с.
4. Абрашкевич Ю. Д., Баладінський В. Л., Міцність і механіка руйнування природніх робочих середовищ. Книга 1-а. Основи механіки ґрунтів. – К.: «Кнуса», 2001. – 212 с.
5. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. – М.: Физматгиз, 1959. – 916 с.
6. Бабаков И. М. Теория колебаний. М., Гостехиздат, 1958. – 256 с.
7. Пелевін Л.Є. Створення високопродуктивних робочих органів землерийних машин: монографія / Л.Є. Пелевін, Є.В.Горбатюк – К.: КНУБА, 2011. – 128с.
8. Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення): навч. посіб. [для студ. спец. «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання»]. / С.В. Кравець. – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – 278 с.
9. Баловнев В. И., Абрамов А. Н., Карнеев Б. А., Кустарев Г. У., Тарасов В. С. Валец вибрационного дорожного катка. А.С. №903457.
10. Патент 68818 України, опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. - 4 с.
11. Патент 72252 України, опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. - 3 с.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

12. Патент 72652 України, опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16. - 6 с.
13. Патент 74586 України, опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. - 3 с.
14. Патент 74588 України, опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. - 4 с.
15. Технологія будівельного виробництва (Книга 1: загальні відомості про будівництво, роботи підготовчого періоду, земляні роботи та ін.): навчальний посібник / О. М. Лівінський, В. С. Дорофєєв, С. А. Ушацький та ін. - К.: УАН, "МП Леся", 2012. - 416 с.
16. «ДСТУ Б В 2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96) Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення. – 26 с.
17. «ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95). Ґрунти. Класифікація. – 47 с.»
18. «ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності: – К.:Мінбуд України, 1996. – 102 с.»
19. «ДСТУ Б В.2.1-5-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань. – 25 с.»
20. «ДСТУ Б.В.2.1-9- 2002 (ГОСТ 19912-2001) ГРУНТИ. Методи польових випробувань статичним і динамічним зондуванням. – 21 с.»
21. Форсблад Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований / Л. Форсблад. - М.: Транспорт, 1987. - 188 с.
22. Терновий В. І. Ущільнення ґрунтів у будівництві / В. І. Терновий, І. М. Уманець, Л. С. Саушева, О. С. Молодід. - К.: «ЦК КОМПРИНТ», 2015. - 136 с.
23. Батулов А. И. и др. Вибрационный каток. А.С. №1142567.
24. Пенчук В. О. Комбіновані робочі органи землерійних машин. Автореферат дисс. докт. техн. наук. Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2004.
25. Попов В. В., Лихачев В. Д. Комплексное использование промышленных отходов Донбасса для изготовления строительных материалов и изделий. Обзор М.: ВНИИЭСМ, 1976. – 54 с.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

26. Попов В. Г. Исследование и обоснование параметров вибрационных катков для уплотнения грунтов. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Ленинградский политехнический институт. – Л., 1970.
27. Теплицкий А. Х., Філатов А. П. Технологія контролю якості ущільнення ґрунтів. – К.: Будівельник, 1985.
28. Kuneš, Josef. (2012). Similarity and Modeling in Science and Engineering. DOI:10.1007/978-1-907343-78-0
29. В.Ц. Жидецкий, В.С. Джигирев, О.В. Мельников. Основы охраны праці. – Львів: Афіша, 1999. – 348с.
30. Talal Alanazi. Construction and Analysis of Experimental Designs. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Science College of Science, Engineering and Health RMIT University. 2018. pages: 176. <https://is.gd/JxH0Ce>
31. Інженерні рішення з охорони праці при розробці дипломних проєктів інженерно – будівельних спеціальностей: Навчальний посібник. За редакцією В.В. Сафонова – Київ: Основа, 2000. – 336 с.
32. Магістерська робота: метод. рекомендації для здобувачів освіти спеціальностей: 192 - Будівництво та цивільна інженерія, 133 - Галузеве машинобудування / [уклад.: В.А. Пашинський, В. А. Настоящий]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. будівельних, дорожніх машин і будівництва. - Кропивницький: ЦНТУ, 2021. - 33 с.
33. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. – Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012.
34. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.
35. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія».

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Додаток А Охорона праці.

А.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на працюючого у визначених умовах приводить до травми або іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на працюючого у визначених умовах приводить до захворювання або зниження працездатності.

Шкідливі і небезпечні виробничі фактори сучасною наукою в значній мірі вивчені, а технікою створюються захисні засоби для забезпечення здоров'я і безпечних умов праці. Тому виробничі захворювання і виробничий травматизм можна виключити цілком, якщо виконувати відповідні інженерні рішення по охороні праці.

Усі небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що супроводжують роботу оператора дорожнього котка й обслуговуючий персонал зведені в таблицю А.1.

А.2. Розробка інженерних рішень по обмеженню впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на обслуговуючий персонал.

А.2.1. Розрахунок стійкості дорожнього котка

Допустимий кут нахилу поверхні руху дорожнього котка встановлюємо з урахуванням коефіцієнта запасу, рівного 1,2. Допустимі кути нахилу поверхонь руху в транспортному режимі визначаємо з умов стійкості, ковзання (сповзання) і реалізації 100% потужності двигуна.

При русі заднім ходом під ухил (лист г.ч. м.р.) з одночасним гальмуванням можливий відрив передньої частини дорожнього котка від опорної поверхні. Перекидання відбувається відносно точки О.

У гіршому випадку сила взаємодії рушія з опорною поверхнею

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця А.1 - Небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що супроводжують експлуатацію дорожнього котка.

№ п/п	Небезпечні і шкідливі виробничі фактори	Місце прояву небезпечного і шкідливого виробничого фактора	Законодавчі акти, що регламентують безпеку праці
1	Втрата стійкості	Кабіна машиніста	ДСТУ 12.2.011-75
2	Недостатня оглядовість робочого майданчика	Кабіна машиніста, дорожні робітники, супутні технологічні машини й устаткування	ДСТУ 12.2.033-70 ДСТУ 12.2.099-80
3	Недостатній гальмовий шлях і гальмовий момент	Дорожні робітники, супутні технологічні машини й устаткування, кабіна машиніста	ДСТУ 12.2.011-75
4	Недостатня освітленість робочого майданчика	Дорожні робітники, супутні технологічні машини й обладнання, кабіна машиніста	ДСТУ 12.2.011-75
5	Надмірний шум	Кабіна машиніста	ДСТУ 12.1.003-83
6	Вібрація	Кабіна машиніста	ДСТУ 12.4.003-80
7	Запиленість і загазованість	Кабіна машиніста	ДСТУ 12.1.005-88
8	Мікроклімат	Кабіна машиніста	ДСТУ 12.1.005-88
9	Токсичність відпрацьованих газів	Навколишнє середовище	ДСТУ 12.1.005-88

$$P_{тр} = \varphi G_{пк} \cos \alpha,$$

де $\varphi = 0,85$ – найбільший розрахунковий коефіцієнт зчеплення пневмоколіс із ґрунтом;

$G_{пк} = 92000$ Н – вага, якою коток впливає на ущільнюваний матеріал чотирма пневмоколесами;

З умови $\sum P_x = 0$ сила інерції

$$P_j = G_{пк} \cdot \varphi \cos \alpha - G \sin \alpha,$$

де $G = 160000$ Н - вага пневмовібраційного котка.

Перекидання котка можливо, якщо

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$l_{\text{ц}} G \cos \alpha = (P_j + G \sin \alpha) h_{\text{ц}} \text{ або}$$

$$l_{\text{ц}} G \cos \alpha = G_{\text{пк}} \varphi \cos \alpha h_{\text{ц}} - G \sin \alpha h_{\text{ц}} + G \sin \alpha h_{\text{ц}}$$

Звідси одержуємо

$$l_{\text{ц}} G = G_{\text{пк}} \varphi h_{\text{ц}} \text{ або } l_{\text{ц}} = \varphi h_{\text{ц}} G_{\text{пк}}/G.$$

Тут $l_{\text{ц}} = 1,31$ м; $h_{\text{ц}} = 1,02$ м – координати центра ваги машини відносно точки 0.

Перекидання дорожнього котка при гальмуванні неможливо за умови

$$l_{\text{ц}} > \varphi h_{\text{ц}} G_{\text{пк}}/G; \quad 1,31 > 0,85 \cdot 1,02 \cdot 92000/160000 = 0,5.$$

З врахуванням коефіцієнта запасу стійкості, рівного 1,2, граничний кут ухилу по зчепленню знаходимо по формулі

$$\alpha_y = \arctg \frac{1}{1,2} \cdot \frac{\varphi L - l_{\text{ц}} (\varphi - f)}{L - (\varphi - f) h_{\text{ц}}} = \arctg \frac{1}{1,2} \cdot \frac{0,85 \cdot 3,1 - 1,31(0,85 - 0,1)}{3,1 - (0,85 - 0,1)1,02} =$$

$$= \arctg 0,591 = 30,6 \text{ град}$$

де $L = 3,1$ м – база дорожнього котка;

$f = 0,1$ - коефіцієнт опору перекочуванню котка.

Підйоми, подолані котком за умовою зчеплення рушія:

при русі переднім ходом

$$\alpha_n = \arctg \frac{\varphi l_{\text{ц}} - fL}{L - \varphi h_{\text{ц}}} = \arctg \frac{0,85 \cdot 1,31 - 0,1 \cdot 3,1}{3,1 - 0,85 \cdot 1,02} = \arctg 0,360 = 19,8 \text{ град};$$

при русі заднім ходом

$$\alpha_n = \arctg \frac{\varphi(L - l_{\text{ц}}) - fL}{L - \varphi h_{\text{ц}}} = \arctg \frac{0,85 \cdot (3,1 - 1,31) - 0,1 \cdot 3,1}{3,1 - 0,85 \cdot 1,02} = \arctg 0,542 = 28,5 \text{ град}$$

Поперечна стійкість котка оцінюється за умовами перекидання на похилій поверхні (лист г.ч. м.р.). Припустимий кут поперечного ухилу за умовою перекидання дорівнює

$$\alpha = \arctg \frac{0,5B}{1,2h_{\text{ц}}} = \arctg \frac{0,5 \cdot 2,0}{1,2 \cdot 1,02} = \arctg 0,817 = 39,2 \text{ град},$$

де $B = 2,0$ – ширина смуги, що ущільнюється.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Припустимий кут поперечного ухилу за умовою зчеплення рушія з дорогою дорівнює

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{0,8 \cdot \varphi}{1,2} = \operatorname{arctg} \frac{0,8 \cdot 0,85}{1,2} = \operatorname{arctg} 0,567 = 29,5 \text{град} .$$

Граничний кут підйому, подоланого котком при 100%-ому використанні потужності двигуна

$$\alpha_n = \arcsin \left[\frac{N\eta}{GV(1+f^2)} - f \right] = \arcsin \left[\frac{110 \cdot 0,8}{160 \cdot 1,5(1+0,1^2)} - 0,1 \right] = 15 \text{град} ,$$

де $N = 110$ кВт – потужність двигуна;

$V = 1,5$ м/с - середня швидкість транспортного режиму;

$\eta = 0,8$ - ККД трансмісії і ходового устаткування.

Використовуючи результати розрахунків, у технічну характеристику дорожнього котка вносимо найменші з отриманих граничних кутів повздовжньої і поперечної стійкості.

Кут повздовжньої стійкості $\alpha_n = 15$ град.

Кут поперечної стійкості $\alpha = 29,5$ град.

A.2.2. Освітленість робочої зони

Для забезпечення безпеки руху і виконання робіт у темний час доби, самохідні машини обладнають освітлювальними приладами. Недостатня освітленість будівельних майданчиків стомлює операторів, приводить до подовження робочого циклу машин, зниженню продуктивності праці, а також різко підвищує імовірність виникнення аварійної ситуації.

У темний час доби ділянка дороги на відстані 10 м перед машиною повинний мати освітленість не менш 0,5 лк. Освітленість місця взаємодії робочого органу з оброблюваним середовищем повинна складати не менш 5 лк.

Силу світла оптичних елементів визначаємо по формулі

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$J = \frac{E \sqrt{(l^2 + h^2)^3 K}}{h \eta},$$

де Е - необхідна освітленість робочої зони;

h - висота установки оптичного елемента над поверхнею рушія;

l - відстань по горизонталі між оптичним елементом і точкою, що розраховується;

К – коефіцієнт запасу, що враховує запиленість повітряного середовища і зниження напруги живлення лампи, К = 1,5;

η – коефіцієнт використання оптичного елемента, η = 0,5 – 0,7.

У точці А при l = 10 м; h = 3,42 і E ≥ 0,5 лк

$$I_A = \frac{E \sqrt{(l^2 + h^2)^3 K}}{h \eta} = \frac{0,5 \sqrt{(10^2 + 3,42^2)^3 1,5}}{3,42 \cdot 0,5} = 423 \text{ кд}$$

У точці Б при l₁ = 0,72 м; h = 3,42 і E ≥ 10 лк

$$I_A = \frac{E \sqrt{(l_1^2 + h^2)^3 K}}{h \eta} = \frac{0,5 \sqrt{(0,72^2 + 3,42^2)^3 1,5}}{3,42 \cdot 0,5} = 306 \text{ кд}$$

У точці З при l₂ = 1,23 м; h = 3,42 і E ≥ 10 лк

$$I_A = \frac{E \sqrt{(l_2^2 + h^2)^3 K}}{h \eta} = \frac{10 \sqrt{(1,23^2 + 3,42^2)^3 1,5}}{3,42 \cdot 0,5} = 344 \text{ кд}$$

У точці Д при l = 10 м; h = 3,42 і E ≥ 0,5 лк

$$I_D = I_A = 423 \text{ кд}$$

У якості світлотехнічних приладів приймаємо по дві фари типу ФГ 1-200 В на передній і задній фронт роботи дорожнього котка з максимальною силою світла I = 7000 кд.

А.2.3. Захист від вібрації

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Підвищені рівні вібрації впливають на здоров'я і працездатність людини.

Тіло працюючого людини умовно розглядають як своєрідну коливну систему, оскільки під впливом вібрації частини тіла людини переміщаються відносно один одного з амплітудами в залежності від джерела коливань і маси органів. Відносне переміщення частин тіла приводять до напруг у зв'язуваннях між частинами тіла і взаємному зіткненню і натисненню.

Тривалі коливання людини з частотою $f=3...5$ Гц шкідливо відбиваються на вестибулярному апараті, серцево-судинній системі і викликають синдром заколисування. Коливання з частотою $f = 5...11$ Гц викликають розлади внаслідок резонансних коливань голови, шлунка, кишечника, у кінцевому рахунку, усього тіла. При коливанні з частотою $f = 11...45$ Гц погіршується зір, виникає нудота, блювота, порушується нормальна діяльність інших органів. Коливання з частотою $f > 45$ Гц викликають ушкодження судин головного мозку; відбувається розлад циркуляції крові і нервової вищої діяльності з наступним розвитком вібраційної хвороби.

Для зниження вібрації, переданої від його джерела до кістяка машини передбачають віброізоляцію – амортизатори, установлені між джерелами вібрації і рамою або остовом. У більшості випадків приймають гумовометалеві амортизатори, у яких арматуру кріплять до гуми способом вулканізації. Ці амортизатори працюють на стиск, чи зрушення на обох зусиль одночасно. Гуму застосовують марок 7 – 8 і 7 – 2959 на основі натурального каучуку.

Основним джерелом вібрації на дорожньому котку є вібровалець. Віброізоляція рами забезпечується амортизатором зрушення АВРМС – 400 (лист г.ч. м.р.) у кількості $K = 4$ із жорсткістю кожного $C = 300$ Н/мм.

Навантаження на кожен амортизатор

$$G_A = \frac{G_P + G_C}{K} = \frac{17800 + 2200}{4} = 5000H,$$

де $G_P = 17800$ Н - вага підамортизованої рами;

$P_3 = 2200$ Н - навантаження від неврівноваженого силового агрегату.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Деформація амортизатора під дією статичного навантаження

$$\delta = \frac{G_A}{C} = \frac{5000}{300} = 16,7 \text{ мм} .$$

Власна частота коливань підресорної рами

$$f_C = \frac{15,8}{\sqrt{\delta}} = \frac{15,8}{\sqrt{16,7}} = 3,87 \text{ Гц} .$$

Частота змушених коливань

$$f_B = \frac{n}{60} = \frac{1600}{60} = 26,7 \text{ Гц} ,$$

де $n = 1600 \text{ хв}^{-1}$ – частота обертання дебалансного вала вібровальця.

Відношення частоти змушених коливань до власного

$$\eta = \frac{f_B}{f_C} = \frac{26,7}{3,87} = 6,9 .$$

Коефіцієнт передачі вібрації

$$\beta = \sqrt{\frac{\eta^2 \sin^2 \varphi + 1}{(\eta^2 - 1)^2 + \eta^2 \sin^2 \varphi}} = \sqrt{\frac{6,9 \cdot 0,092^2 + 1}{(6,9 - 1)^2 + 6,9 \cdot 0,092^2}} = 0,0254 ,$$

де $\sin \varphi = 0,092$ - синус кута зрушення.

Це відповідає 97,46% гасіння вібрації.

Прийнявши розмах коливань вібровальця $A_B = 3 \text{ мм}$, одержимо розмах коливань рами $A_P = \beta A_B = 0,0254 \cdot 3 = 0,076 \text{ мм}$, що менше припустимого розмаху для віброкотків, рівного $0,1 - 0,12 \text{ мм}$.

А.2.4. Розрахунок запобіжного клапана

Запобіжний клапан встановлений у системі гідроприводу рульового керування з номінальним робочим тиском $p_{\text{ном}} = 8 \text{ МПа}$, максимальним тиском $p_{\text{max}} = 10 \text{ МПа}$.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Потік робочої рідини створюється насосом НШ – 32 з робочим обсягом $q = 32 \text{ см}^3$ і частотою обертання приводного вала $n = 2100 \text{ хв}^{-1}$.

Витрата рідини через запобіжний клапан

$$Q = q \cdot n \cdot \eta_0 / 1000 = 32 \cdot 2100 \cdot 0,95 / 1000 = 63,8 \text{ л / хв.},$$

де $\eta_0 = 0,95$ – об'ємний ККД насоса.

Приймаємо швидкість руху в каналі запобіжного клапана $V = 12 \text{ м/с}$.

Діаметр каналу

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 12}} = 0,0106 \text{ м}.$$

Приймаємо $d_0 = 11 \text{ мм}$.

Початкове зусилля відкриття клапана

$$P_1 = p_{ном} \frac{\pi d_0^2}{4} = 8 \cdot 10^6 \frac{3,14 \cdot 0,011^2}{4} = 760 \text{ Н}.$$

Кінцеве зусилля відкриття клапана

$$P_1 = p_{max} \frac{\pi d_0^2}{4} = 10 \cdot 10^6 \frac{3,14 \cdot 0,011^2}{4} = 950 \text{ Н}.$$

Робочий хід $h = 5 \text{ мм}$.

Відносний інерційний зазор пружини $\delta = 0,2$.

Сила пружини при максимальній деформації

$$P_3 = \frac{P_2}{1 - \delta} = \frac{950}{1 - 0,2} = 1188 \text{ Н}.$$

Приймаємо пружину стискання І класу, розряду 3 № 131 з діаметром дроту $d = 5,5 \text{ мм}$, зовнішнім діаметром пружини $D = 28 \text{ мм}$ і жорсткістю одного витка $z_1 = 803,3 \text{ Н/мм}$.

$$Z = \frac{P_2 - P_1}{h} = \frac{950 - 760}{0,005} = 38000 \text{ Н / м}.$$

Число робочих витків

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$n = \frac{Z_1}{Z} = \frac{803300}{38000} = 21$$

Повне число витків $n_1 = n + n_2 = 21 + 2 = 23$,

де $n_2 = 2$ - число опорних витків.

Середній діаметр пружини $D_0 = D - d = 28 - 5,5 = 22,5$ мм.

Індекс пружини $C = D_0 / d = 22,5 / 5,5 = 4,1$.

Попередня деформація $F_1 = P_1 / Z = 760 / 38000 = 0,02$ м.

Робоча деформація $F_2 = P_2 / Z = 950 / 38000 = 0,025$ м.

Максимальна деформація $F_3 = P_3 / Z = 1188 / 38000 = 0,031$ м.

Висота пружини при максимальній деформації

$H_3 = (n_1 + 1 - n_3) d = (23 + 1 - 2) d = 121$ мм,

де $n_3 = 2$ число зашліфованих витків.

Висота пружини у вільному стані

$$H_0 = H_3 + F_3 = 121 + 31 = 152 \text{ мм.}$$

Висота пружини при попередній деформації H_1 (визначає габарити вузла пружини стиску).

$$H_1 = H_0 - F_1 = 152 - 20 = 132 \text{ мм.}$$

Крок пружини $t = f_3 + d = 1,469 + 5,5 = 7$ мм,

де $f_3 = 1,469$ мм - прогин одного витка пружини № 131.

Діаметр кульки $d_{ш} = 1,5 d_0 = 1,5 \cdot 11 = 16,5$ мм.

Приймаємо $d_{ш} = 20$ мм.

А.3 Заходи з протипожежної профілактики

Відповідно ДО ДЕРЖСТАНДАРТУ 12.1.033-81 і ССБТ. Пожежна безпека. «Терміни і визначення». Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому з

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

встановленою імовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожежі і вплив на людей небезпечних факторів пожежі, а також захисту матеріальних цінностей.

Основні правила пожежної безпеки при роботі на котку:

1. Забороняється працювати на котку не оснащеному засобами пожежегасіння;

2. Машиніст повинний періодично перевіряти стан паливного бака і герметичність паливопроводів машини. Виявлені нещільності і підтікання слід негайно усунути;

3. На машині чи в безпосередній до неї близькості не повинно бути замасленого чи просоченого паливом дрантя й інших обтиральних матеріалів;

4. Забороняється курити і користатися відкритим вогнем при ремонтних роботах, обслуговуванні і т.д. на машині, а також поблизу від місця її стоянки, особливо під час заправлення машини паливом, знаходження поряд емульсії, бітуму;

5. При запаленні палива на машині, чи біля її забороняється заливати вогонь водою. Гасити полум'я слід вогнегасником, піском, землею, або накривати полум'я брезентом.

6. Якщо неможливо згасити пожежу самотужки, необхідно викликати будь-якими способами і засобами зв'язку допомогу з найближчого відділення пожежної охорони.

Паливом для двигуна УД-25 котка ДУ-52 є бензин А-72, А-76 і відноситься він до легкозаймистих рідин, а масло гідросистеми є горючою рідиною. Паливо зберігається в баку при температурі навколишнього середовища та при атмосферному тиску. Бак змонтований в передній частині котка де він захищений від випадкового запалення при короткому замиканні у проводці. Підтікання палива з паливопроводів недопустимо. У гідросистемі використовується робоча рідина двох сортів: ВМГЗ (ТУ №38-101479-74) та МГ-30 (ТУ №38-1-01-50-70). Підтікання робочої рідини з трубопроводів також

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

недопустимо. Заправляти коток паливом дозволяється при вимкненому двигуні та запаленні.

Робоче місце з точки зору пожежної безпеки є небезпечним. На випадок запалення робоче місце моториста оснащено вогнегасником ОУ-5, який надає змогу гасити полум'я під напругою. Не допускається гасіння вогнегасником речовин, які горять без доступу повітря.

Вогнегасник розташований на машині згідно ГОСТ 12.1.045-84

А.4. Заходи безпеки при роботі на дорожньому котку ДУ-52.

1. Коток можна експлуатувати тільки якщо справні всі його вузли.
2. Попереду і позаду ділянки дороги, на котрій виконуються роботи, необхідно встановити відповідні дорожні сигнальні знаки. В темний період доби ділянку, на котрій працює коток, слід освітити ліхтарями.
3. Якщо працює декілька котків, інтервали між ними повинні бути не менше 5м.
4. При русі котка під уклон його слід пригальмувати, не даючи йому розігнатися.
5. Поставивши коток на стоянку, необхідно його загальмувати.
6. Майданчик моториста слід утримувати в чистоті. Не можна класти на неї сторонні предмети.
7. Під час роботи котка моторист повинен знаходитися на своєму робочому місці.
8. Під час роботи котка стороннім особам знаходитися на ньому забороняється.
9. Заборонено:
 - а) залишати коток під час роботи без керування;
 - б) сходити з котка під час його руху;
 - в) ставити коток поперек дороги;

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

г) виконувати будь-які роботи по технічному обслуговуванню під час руху котка або при працюючому двигуні;

д) користуватися відкритим вогнем під час заправки котка горючим;

є) зберігати горюче на площадці моториста;

ж) запускати двигун з допомогою буксира.

10. Категорично забороняється сидіти або лежати на землі поблизу котків, що працюють з ввімкненим вібратором.

11. При виконанні робіт по ущільненню поблизу будівель і споруд, на мостах і т.ін. вмикати вібратор забороняється.

12. Сумарна тривалість роботи котка з ввімкненим вібратором на протязі робочої зміни не повинна перевищувати 4-х годин.

А.5. Правила виконання ремонтних робіт

1. До виконання ремонтних робіт допускаються особи, що мають відповідну кваліфікацію і знають правила безпеки проведення робіт.

2. Для проведення ремонтних робіт необхідно прийняти заходи проти самодовільного переміщення котка. Для цього необхідно під вальці покласти дерев'яні бруски висотою 50...80мм.

3. Машина, поставлена на ремонт, повинна бути очищена від бруду.

4. Забороняється виконання ремонтних операцій на котку з працюючим двигуном, крім випадків регулювання двигуна.

5. Перед зняттям двигуна або окремих вузлів паливної системи необхідно злити паливо. (з нижнього бака паливо зливати не обов'язково).

6. Перед виконанням робіт пов'язаних з застосуванням високих температур (зварювання, різання і т. ін.) паливо з баків необхідно злити повністю, а баки продути повітрям (висушити) або у крайньому випадку, наповнити водою.

7. При виконанні монтажних і демонтажних робіт необхідно приймати заходи проти падіння вузлів і деталей.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

8. При виконанні ремонтних робіт забороняється користуватися несправними інструментами.

9. При роботі з вантажопідйомними механізмами необхідно слідкувати щоб під вантажем або в радіусі дії вантажопідйомного пристрою не знаходилися люди і щоб піднімаємий вантаж був надійно закріплений.

10. До роботи з вантажопідйомними пристроями допускаються тільки ті особи, що пройшли навчання і перевірку знань правил безпеки по куруванню вантажопідйомними механізмами.

11. При виконанні ремонтних робіт необхідно виконувати правила протипожежної безпеки (див. пункт 7.3).

12. Перед початком ремонтних робіт перевіряють надійність посадки рукояток на інструмент – наявність клинів у рукоятці молотка або кувалди, металевих кілець на рукоятках викруток, або напильників і т.п.

13. Інструменти повинні бути постійно справними: ударний інструмент не повинен мати збитих бойкових частин, в рукоятках не повинно бути тріщин, задирок і т.п.

14. Рукоятки стандартних ключів подовжувати трубами забороняється, щоб запобігти травмуванню робітника при поломці губок ключа, зриванні нарізі і т.п.

15. Закручувати болти і гайки з невідповідним розміром зів а або класти у зів ключа прокладки (відкрути, інший ключ і т.п.) між гранню гайки (болта) забороняється.

16. Забороняється бити по рукоятках інструмента, не призначеного під ударне навантаження.

17. Механізований інструмент (гайковерт, дрель і т.п.) вмикають тільки після встановлення в робоче положення.

18. При оглядах і ремонтах електричного або пневматичного механізованого інструмента його слід вимикати з джерел енергії.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

19. При роботі з будь-яким ручним або механізованим інструментом необхідно стежити за тим, щоб інструмент (викрутка, свердло, зубило не був спрямований в бік руки, яка підтримує оброблювану деталь.

19. Працюють з ручним і механізованим інструментом в рукавицях.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Додаток В

ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

до кваліфікаційної роботи магістра на тему:

**« Підвищення технічного рівня дорожнього вібраційного котка
при ущільненні дорожніх основ складених відходами
металургійного виробництва»**

(18 слайдів, у тому числі 4 креслення формату А1)

Допустити до захисту

Завідувач кафедри БДМБ, к.т.н., професор

Владислав НАСТОЯЩИЙ

" ____ " _____ 2024 р.

Виконав: здобувач освіти групи ГМ-22М-2
спеціальності 133
«Галузеве машинобудування»

Олександр АНТОНЮК

" ____ " _____ 2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи магістра:
кандидат технічних наук, доцент

Сергій КАРПУШИН

" ____ " _____ 2024 р.

					КМР 2213301 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		