

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## **Пояснювальна записка** **До кваліфікаційної роботи магістра**

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

## **Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні**

Виконав: студент VI курсу, групи 601-ММВ  
напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

**Кричинський Євген Анатолійович**  
(прізвище та ініціали)

Керівник проф. Коробко Б.О.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Сердюк В.О.  
(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження геометричних параметрів котків для  
ущільнення ґрунту з різною формою поверхні**

**Кваліфікаційна робота магістра**

**Лист затвердження**

**ГМтаМ 601ММв.010-00.00.000 МР**

Технологічний контроль к.т.н., доц.  
\_\_\_\_\_ О.С. Васильєв  
„23” 08 2024р.

Нормативний контроль к.т.н., доц.  
\_\_\_\_\_ О.С. Васильєв  
„23” 08 2024р.

Розробив студент групи 601-ММв  
\_\_\_\_\_ Є.А. Кричинський  
„25” 08 2024р.  
Керівник к.т.н., проф.  
\_\_\_\_\_ Б.О. Коробко  
„23” 08 2024р.

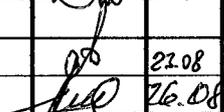
**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
галузевого машинобудування та мехатроніки  
к.т.н., доц.

\_\_\_\_\_ О.В. Орісенко

Гарант ОП \_\_\_\_\_ М.М. Нестеренко

Полтава – 2024 рік

№ рядок	Форм.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
1					
2			Документація загальна		
3					
4			Вперше розроблена		
5					
6	A4	ГМтаМ 601ММв.010-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	
7	A4	ГМтаМ 601ММв.010--00.00.000А	Анотація	3	
8	A4	ГМтаМ 601ММв.010--00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка		
9					
10			Документація наукова		
11					
12			Вперше розроблена		
13					
14	A4	ГМтаМ 601ММв.010--00.00.000ПМ	Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення		
15			грунту з різною формою поверхні		
16			Презентаційні матеріали	13	
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

					<b>ГМтаМ 601ММв.010--00.00.000ВМ</b>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кричинський		21.08	Лім.	Лист	Листів
Перев.		Коробко		26.08	Н	1	1
Н.контр.		Васильєв		21.08	Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Затв.		Орисенко		26.08			
					Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні Відомість кваліфікаційної роботи магістра		

ЗАТВЕРДЖЕНО

Наказ Міністерства освіти і науки,  
молоді та спорту України  
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.01

**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки

Кафедра, циклова комісія Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри галузевого

машинобудування та

мехатроніки

О.В. Орисенко

"20"

03

2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

до кваліфікаційної роботи магістра

Кричинського Євгена Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи

**«Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною  
формою поверхні»**

керівник \_\_\_\_\_ д.т.н., проф Коробко Б.О.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18.03.2024 № 309/ПА

1. Строк подання студентом роботи 20 серпня 2024

2. Вихідні дані до роботи Результати практики, Інформація з науково-  
практичних періодичних видань України, нормативні документи тощо.  
Конструктивні схеми.

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) 1 Аналіз технології ущільнення асфальтобетонних дорожніми котками  
2 Ущільнення асфальтобетонної суміші вібраційним котком 4. Перелік графічного  
матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) «Дослідження геометричних  
параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні» графічні  
матеріали (14 листів А4)

## Анотація

Кваліфікаційна робота магістра на тему: «Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні»

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування – Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024

Робота складається з двох розділів.

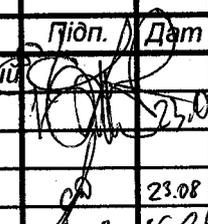
У даній роботі досліджено та проаналізовано процес ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою вібраційних котків з варіацією зусиль вібрації. Аналіз наявних досліджень, що зосереджені на обладнанні та технології ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей, а також на закономірностях зміни характеристик дорожніх матеріалів під час укатки, дозволяє сформулювати наступні висновки:

– Більшість сучасних засобів ущільнення характеризуються обмеженою універсальністю і вузьким діапазоном варіювання силових впливів на шар асфальтобетонної суміші. Це знижує їх ефективність з точки зору продуктивності та витрат на укатку, а також ускладнює досягнення якісного дорожнього покриття.

– Для підвищення ефективності технології ущільнення необхідно оптимізувати параметри вібрації. Це допоможе усунути недоліки існуючих дорожніх котків і розширити їх застосування в різних температурних умовах укатки.

– Розглянуто математичну модель, що описує процес взаємодії робочих органів котків з дорожнім покриттям. Ця модель дозволяє визначити оптимальні параметри котка для ущільнення та налаштування його режиму при укатці конкретної асфальтобетонної суміші.

ГМтаМ 601ММв.010-00.00.000 А

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Кричинський		23.08	Н		
Перев.		Коробко					
Керівн.							
Н. контр.		Васильєв		23.08			
Затв.		Орисенко		16.08			

Анотація

Національний університет  
«Полтавська політехніка імені  
Юрія Кондратюка»

– Запропоновано методику розрахунку параметрів впливу вібраційного котка, базуючися на зміні зусиль вібрації в залежності від товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації.

– Для досягнення найбільшої ефективності ущільнення певної асфальтобетонної суміші важливо встановити залежності її міцності від щільності та температури в межах, відповідних укатці дорожніх покриттів.

**Ключові слова:** каток, процес ущільнення, статичне ущільнення.

					Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	

**ГМтаМ 601ММв.010-00.00.000 А**

## Annotation

**Master's qualification thesis on the topic: "Study of the geometric parameters of rollers for soil compaction with different surface shapes"**

**Master's qualification thesis** for obtaining the educational and qualification level of a master's degree in the specialty 133 Industrial Engineering – National University "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk," Poltava, 2024.

The work consists of two sections.

This thesis investigates and analyzes the process of asphalt concrete mixture compaction using vibratory rollers with varying vibration forces. An analysis of existing studies focused on equipment and technology for compacting hot asphalt concrete mixtures, as well as on the patterns of changes in road material characteristics during rolling, allows us to formulate the following conclusions:

Most modern compaction tools are characterized by limited versatility and a narrow range of force variations applied to the asphalt concrete layer. This reduces their efficiency in terms of productivity and rolling costs, as well as complicates the achievement of high-quality road surfaces.

To improve the efficiency of compaction technology, it is necessary to optimize the vibration parameters. This will help eliminate the shortcomings of existing road rollers and expand their use in various temperature conditions during rolling.

A mathematical model describing the interaction process between the working bodies of rollers and the road surface has been considered. This model allows for the determination of optimal roller parameters for compaction and the adjustment of its mode for rolling a specific asphalt concrete mixture.

A method for calculating the impact parameters of a vibratory roller is proposed, based on the change in vibration force depending on the thickness of the asphalt concrete layer being compacted in the zone of active vibration action.

To achieve the highest compaction efficiency for a specific asphalt concrete mixture, it is important to establish the dependencies of its strength on density and temperature within the ranges relevant to road surface rolling.

**Keywords:** roller, compaction process, static compaction.

					ГМмаМ 601ММв.010-00.00.000 А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження геометричних параметрів котків для  
ущільнення ґрунту з різною формою поверхні**

**Пояснювальна записка**

**Кваліфікаційної роботи магістра**

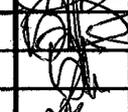
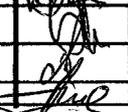
**ГМтаМ 601ММв.010-00.00.000 ПЗ**

Полтава – 2024 рік

## Зміст

Вступ .....	3
1 Аналіз технології ущільнення асфальтобетонних сумішей дорожніми катками .....	5
1.1 Сучасні методи ущільнення асфальтобетонних покриттів .....	5
1.2 Вплив ущільнення на фізико-механічні властивості асфальтобетонних сумішей.....	17
2 Ущільнення асфальтобетонної суміші вібраційним котком .....	27
2.1 Аналіз технологій ущільнення асфальтобетону.....	27
2.2 Визначення взаємодії котка із сумістю яка ущільнюється .....	37
2.3 Визначення впливу вимушуючої сили вібратора на ґрунт.....	42
Висновки .....	57
Список літератури .....	58

**ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ**

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.		Кричинський		
Перев.		Коробко		23.08
Керівник		Коробко		23.08
Н. контр.		Васильєв		23.08
Зате		Олександр		26.08

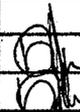
Зміст

Літ.	Лист	Листів
Н	2	
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

## Вступ

У роботі проведено дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні, а також процесу ущільнення асфальтобетонної суміші вібраційними котками зі змінною вимушуючою силою. Внаслідок своєї не універсальності дорожні катки не можуть ефективно виконувати укочування асфальтобетонної суміші протягом усього процесу ущільнення, а також на заваді універсальності стає вузький діапазон регулювання силових впливів. Під час будівництва виникає потреба в залученні декількох видів котків з різними контактними тисками, що прикладаються до ущільнюючого матеріалу, з постійно змінюваними фізико-механічними властивостями. Через це існуюча технологія ущільнення ускладнена складною організацією виконання робіт, високою залежністю від людського фактору та великою кількістю вимушених простоїв обладнання. Збільшення парку техніки призводить до підвищення витрат на будівництво, що в свою чергу знижує продуктивність ковзанок у складі комплекту машин і збільшує собівартість укатки дорожнього покриття. Отже, існуючі засоби ущільнення асфальтобетонних сумішей є неефективними з точки зору продуктивності та собівартості, що обумовлює необхідність створення багатофункціонального дорожнього катка, а також дослідження та розробки методів розрахунку його параметрів.

Таким чином, створення багатофункціонального дорожнього катка та розробка методів розрахунку його параметрів є критично важливими для підвищення ефективності будівництва та ремонту автомобільних доріг. Особливо це актуально в умовах сучасної України, де відновлення транспортної інфраструктури є пріоритетним завданням.

<b>ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>								
<b>Зм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підп.</b>	<b>Дат</b>				
		Кричинський		25.08	Вступ	<b>Літ.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листів</b>
<b>Розроб.</b>		Коробко		25.08		H		3
<b>Перев.</b>		Коробко		27.08		Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
<b>Керівник</b>		Васильєв		26.08				
<b>Н. контр.</b>		Орисянко						
<b>Зате.</b>								

Відбудова автомобільних доріг в Україні має важливе значення для економічного розвитку країни та забезпечення безпеки на дорогах. Після масштабних руйнувань, завданих інфраструктурі під час війни, необхідно не лише відновити пошкоджені дороги, але й значно підвищити їх якість та довговічність. Використання новітніх технологій ущільнення асфальтобетонних сумішей, зокрема розробка та впровадження багатофункціональних катків, дозволить зменшити витрати на ремонтні роботи, підвищити якість укладання дорожнього покриття та забезпечити більш тривалий термін його експлуатації.

Успішне впровадження таких технологій сприятиме швидкому та ефективному відновленню дорожньої інфраструктури, що, в свою чергу, сприятиме відновленню економіки країни та покращенню якості життя населення.

					<b>ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
						4
	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

# 1 Аналіз технології ущільнення асфальтобетонних дорожніми котками

## 1.1 Сучасні методи ущільнення асфальтобетонних покриттів

Одним з ключових аспектів будівництва дорожніх покриттів є процес ущільнення асфальтобетонних сумішей, які укладаються на підготовлену поверхню. Основною метою цього процесу є досягнення високих експлуатаційних якостей асфальтобетонного покриття, таких як довговічність, тріщиностійкість, висока опірність до утворення колій та інші.

Нормативно-технічна документація [1] визначає використання комплектів машин, що включають самохідні асфальтоукладачі, котки різних типорозмірів і допоміжні машини з відповідними пристосуваннями. Асфальтоукладачі призначені для рівномірного розподілу суміші по поверхні основи та укладання її шаром необхідної товщини з заданим профілем. У конструкції таких машин передбачені трамбуючі бруси та вигладжувальні плити, які виконують попереднє ущільнення матеріалу.

Аналіз досліджень [2], присвячених оцінці ущільнюючої здатності асфальтоукладачів, показує, що сучасні асфальтоукладачі часто не здатні забезпечити необхідний коефіцієнт ущільнення дорожнього покриття. Це вимагає застосування додаткових вібраційних впливів на завершальному етапі будівельних робіт.

У процесі дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення ґрунту з різною формою поверхні особлива увага приділяється ефективності ущільнення асфальтобетонних сумішей при використанні вібраційних котків. Вибір котка із відповідною геометрією роликів і налаштуваннями вимушуючої сили є критично важливим для досягнення оптимальних результатів.

					<b>ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>		
<b>Зм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Діоп.</b>	<b>Дат</b>	Аналіз технології ущільнення асфальтобетонних дорожніми котками		
<b>Розроб.</b>	Кричинський						
<b>Перев.</b>	Коробко			23.08			
<b>Керівник</b>	Коробко			23.08			
<b>Н. контр.</b>	Васильєв			23.08			
<b>Затв.</b>	Описенко			26.08	<b>Літ.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листів</b>
					Н	5	
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

Внаслідок обмежень універсальності існуючих дорожніх катків, які не можуть забезпечити ефективне ущільнення асфальтобетонних сумішей протягом усього процесу, виникає необхідність використання кількох видів котків з різними контактними тисками. Це ускладнює технологію ущільнення, збільшує витрати на обладнання та призводить до зниження продуктивності та збільшення собівартості укатки дорожнього покриття.

Відновлення автомобільних доріг в Україні, особливо в умовах післявоєнного відновлення інфраструктури, вимагає нових підходів до ущільнення. Важливо не лише відновити пошкоджені дороги, але й підвищити їх якість, використовуючи сучасні технології ущільнення, що дозволить зменшити витрати та підвищити довговічність дорожнього покриття. Створення і впровадження багатофункціональних катків, які враховують геометричні параметри та специфіку вібраційного впливу, є критичним для покращення якості будівництва та ремонту доріг в Україні.

На даний час для ущільнення покриттів, що виконуються з гарячих асфальтобетонних сумішей, найбільш широко застосовуються самохідні дорожні катки різних типів. До них належать катки з гладкими металевими вальцями, на пневматичних шинах, вібраційні катки, а також комбіновані ущільнюючі машини, що складаються з двох осей, одна з яких має пневматичні шини, а інша — гладкий металевий вібровалець. Кожен тип котків виготовляється з різними конструктивними параметрами, такими як маса, розміри робочого органу, конструкція вібратора тощо. Це обумовлено історичними змінами та постійно зростаючими вимогами до технології дорожніх робіт.

З огляду на свою універсальність, значне поширення отримали гладковальцеві статичні катки (рисунок 1.1). Ці катки використовуються як для проведення ремонтних робіт, так і для укладання нових покриттів на великих площах. Вони мають просту та надійну конструкцію, що забезпечує їх популярність в різних видах дорожнього будівництва.

Залежно від загальної маси, гладковальцеві катки поділяються на три

					<b>ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
						6
<b>Зм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підп.</b>	<b>Дата</b>		

класи: легкі — до 6 тонн, середні — 6-8 тонн, та важкі — понад 10 тонн. Такий поділ дозволяє ефективно використовувати їх на різних етапах ущільнення: легкі катки застосовуються на початковій стадії ущільнення, середні — на основній, а важкі — на заключній стадії.

Вибір конкретного типу катка та його параметрів залежить від вимог до якості ущільнення, типу асфальтобетонної суміші, а також від умов експлуатації покриття. Ефективне використання катків з різними робочими органами та налаштуваннями дозволяє досягти оптимального ущільнення, що є ключовим фактором для забезпечення довговічності та надійності дорожніх покриттів.

Додатковими параметрами роботи статичного катка, які впливають на якість кінцевого дорожнього покриття, є швидкість руху машини та кількість проходів по одному сліду. На початковій стадії укочування рекомендується обмежити швидкість до 1,5-2,0 км/год, на основній стадії швидкість повинна бути в межах 3-5 км/год, а на завершальному етапі — не перевищувати 2-3 км/год.

Необхідна кількість проходів визначається залежно від типу та температури асфальтобетонної суміші, товщини шару матеріалу та швидкості руху ущільнюючої машини. Статичні гладковальцеві катки відзначаються високою надійністю та простотою в експлуатації, але мають кілька суттєвих недоліків, серед яких низька продуктивність і висока металоємність.

Частково уникнути цих недоліків вдалося завдяки застосуванню пневмоколісних катків для ущільнення дорожніх покриттів (рисунок 1.2). Відмінною особливістю пневмоколісних катків є здатність їх робочих органів до деформації під час ущільнення асфальтобетонної суміші, що призводить до збільшення площі контакту шини з дорожньою поверхнею та тривалості впливу на матеріал. Це дозволяє зменшити кількість проходів по одному напрямку і підвищити швидкість укатки [3].

Дослідження [4] показали, що використання пневмоколісних катків значно збільшує глибину активної зони ущільнення, яка більш ніж вдвічі перевищує значення, характерні для гладковальцевих дорожніх машин. Тому доцільним є застосування пневмоколісних катків для ущільнення товстих шарів асфальтобетонних сумішей, що дозволяє досягти максимальної продуктивності робіт.

Важливою перевагою катків статичної дії з пневматичними шинами, порівняно з іншими типами ущільнюючих машин, є відсутність дроблення мінерального скелета суміші. Це знижує ризик утворення тріщин на поверхні дорожнього покриття та значно підвищує його водостійкість [6].

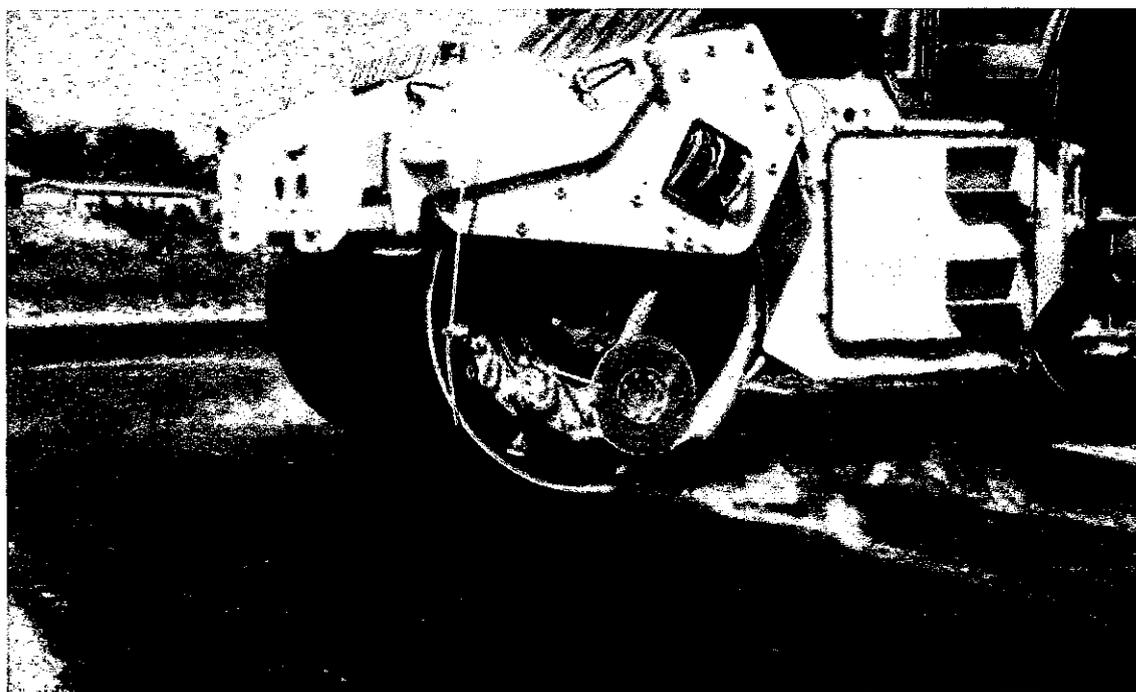


Рисунок 1.1 – Каток статичної дії

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

8



Рисунок 1.2 – Пневмоколісний каток статичної дії



Рисунок 1.3 – Каток статичної дії з металевим та пневмоколісним вальцем  
ДУ-84

Цей факт зумовлює широке застосування пневмоколісних катків при ущільненні сумішей, що складаються з матеріалів із низькою міцністю, а також мають високий вміст щебеню.

Попри переваги та конструктивні особливості, пневмошинні катки мають і певні недоліки. Зокрема, коливання ущільнювального засобу у вертикальній площині, спричинене пружною деформацією пневматичних шин, може призводити до незадовільної поздовжньої рівності покриття. Крім того, наявність зазорів між колесами катка негативно впливає на рівність покриття в поперечному напрямку [9].

Дослідники відзначають, що висока продуктивність пневмокатків спостерігається лише на початковому етапі ущільнення асфальтобетонної суміші при температурі 140-115 °С, що значно обмежує їх ефективність у подальшому процесі [4, 5].

Отже, для забезпечення високої якості ущільнення необхідно поєднувати використання гладковальцевих і шинних катків, що реалізовано в деяких моделях катків (рисунок 1.3).

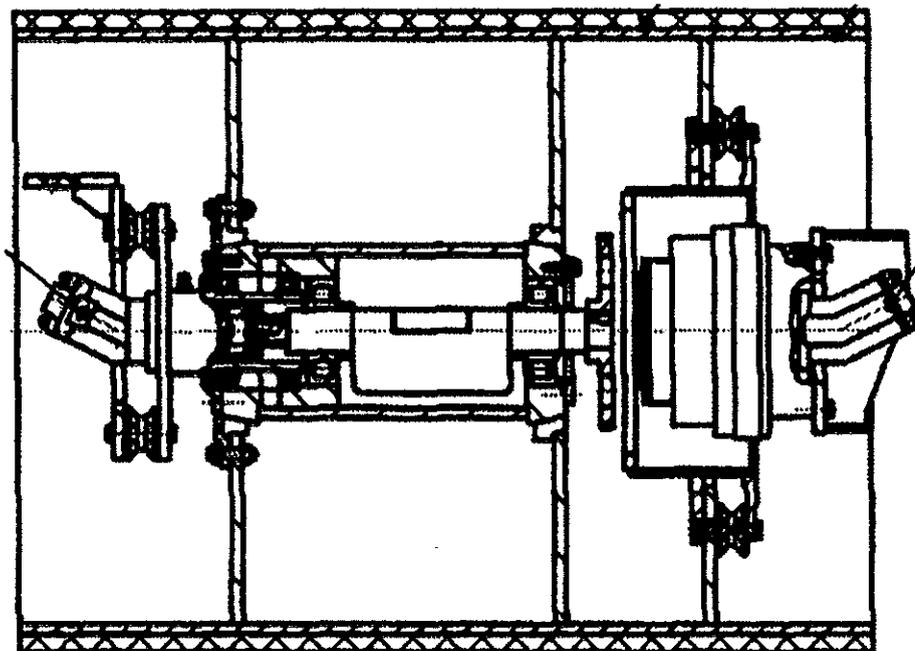


Рисунок 1.4 – Каток з вібраційним вальцем

З підвищенням вимог до щільності верхніх шарів дорожнього покриття та темпів виконання робіт з укочування асфальтобетонної суміші зросла потреба у вібраційних котках (рисунок 1.4). Вивчення впливу вібрації на ущільнюваний матеріал, встановлення оптимальних режимів роботи машин з вібровальцем та їх конструктивна оптимізація є предметом численних досліджень [3].

Застосування цього типу котків дало змогу значно пришвидшити процес укочування, одночасно знижуючи металоємність машин. Завдяки зменшенню тертя між вібровальцем і матеріалом підвищується рухливість суміші в зоні контакту, що забезпечує краще ущільнення асфальтобетонної суміші. Поверхня, ущільнена вібраційними котками, характеризується вищою міцністю та водостійкістю, що підвищує її довговічність.

Робочий орган вібраційного котка виконує кілька циклів навантаження асфальтобетонної суміші за один прохід, що суттєво скорочує необхідну кількість проходів машини по одному сліду та загальний час укочування дорожньої поверхні. На практиці частота прикладання навантаження коливається в межах 60 Гц, причому експериментальні дослідження встановили оптимальне значення на рівні 50 Гц.

Іншим важливим показником, що впливає на процес ущільнення, є відносна вимушуюча сила, яка визначається як відношення відцентрової сили до маси коливаючих частин машини. Дослідження [7] показують, що підвищення цього параметра сприяє зростанню ефективності віброущільнення, причому рекомендовано тримати його на рівні трьох.

У роботах [10] зазначається, що значне підвищення динамічних навантажень відбувається, якщо значення відносної вимушуючої сили перевищує шість. Тому пропонується встановлювати цей показник у межах 2-4, а також рекомендується проводити вібраційне ущільнення асфальтобетонних

сумішей при швидкості 3,0 км/год, що дозволяє забезпечити оптимальне поєднання якості укочування та темпів виконуваних робіт.

Якщо вібраційні котки використовуються з оптимальними параметрами та режимами ущільнення, їхня продуктивність може досягати максимальних значень, що еквівалентні продуктивності статичних катків, маса яких у рази більша, що підтверджується дослідженнями [11]. Однак дослідження показали, що така висока ефективність ущільнення можлива лише в температурах вище 80°C. Зокрема, в роботах [4] відзначається, що чим надмірний динамічний вплив на неуцільнений матеріал, який призводить до розущільнення суміші та утворення зсувів, використання вібраційних котків на початковій стадії ущільнення можливе лише з вимкненим вібратором. Робота в статичному режимі значно знижує продуктивність віброкатка та збільшує тривалість дорожніх робіт.

Застосування вібраційного режиму на завершальному етапі ущільнення може негативно вплинути на якість асфальтобетонного покриття, оскільки може призвести до утворення нерівностей та тріщин на поверхні. Це викликано неконтрольованим зростанням динамічних зусиль з боку робочого органу через збільшення амплітуди коливань та відцентрової сили.

Отже, найбільш раціональним підходом є використання вібраційних котків на основній стадії ущільнення в температурному діапазоні 75-110°C. На завершальному етапі укочування, як і у випадку з пневмоколісними ущільнювальними машинами, доцільно застосовувати важкі статичні катки.

Застосування вібраційних котків для ущільнення тонких шарів асфальтобетонного покриття, особливо на жорстких основах, має певні обмеження. Надмірний динамічний вплив на матеріал може призвести до дроблення мінерального скелета суміші, що негативно впливає на міцність та довговічність дорожнього покриття.

Важливою залишається проблема захисту оператора від впливу вібрації.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Незважаючи на сучасні технологічні рішення, які впроваджують провідні виробники котків, повністю усунути негативний вплив вібрації на людину поки що не вдалося.

Часткове поєднання переваг пневмошинних і вібраційних котків було досягнуто в конструкції комбінованих ущільнювальних машин, які оснащені робочими органами обох типів. Однак така конструкція виявилася ефективною переважно при ущільненні шарів асфальтобетонної суміші товщиною 10-15 см [10].

Інший підхід до поєднання властивостей різних типів котків був реалізований компанією Sakai, яка розробила дорожню машину з пневмоколісним вібраційним робочим органом. Завдяки комбінації збільшеної глибини активної зони ущільнення та впливу вібрації, цей коток може зрівнятися за продуктивністю з традиційними пневмошинними катками, які мають в 2,5 рази більшу масу [14]. Однак при низькому тиску в шинах ефективність віброущільнення в цій конструкції знижується через поглинання робочим органом коливань, що створюються віброзбудувачем.

З урахуванням того, що рідини мають дуже низьку стисливість, було запропоновано замінити повітря в шинах водою. Це дозволяє значно підвищити передачу ущільнювальних зусиль від вібратора до асфальтобетонного шару. У результаті енергоємність процесу укатки покриття вібраційним гідрошинним катком [16] зменшилася в 2 рази порівняно з базовим ДУ-98. Однак ці ущільнювальні засоби зберігають основний недолік колісних робочих органів, а саме нездатність забезпечити необхідну рівність поверхневого шару. Це робить необхідним використання важкого статичного катка на завершальній стадії ущільнення.

Застосування статичних котків з гумовими вальцями дозволяє поєднати високі показники рівності дорожнього покриття з перевагами пневмошинних робочих органів [12]. Проте висока схильність гумового покриття до

					<b>ГМiМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
<b>Зм.</b>	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		13

зношування і складність його заміни обмежують поширення цього типу ущільнювальної техніки.

Цікавим є також дорожній каток із перфорованими вальцями, запропонований в роботі [19]. Отвори на робочому органі цієї машини створюють на поверхні асфальтобетону чергування зон навантаження та розвантаження, що сприяє інтенсифікації процесу ущільнення. Рівномірний розподіл щільності покриття забезпечується завдяки послідовному зміщенню областей з низьким контактним тиском, адже ймовірність точного повторного збігу цих областей є мінімальною. Втім, нерівномірне прикладання навантажень робочим органом та постійні зміни у властивостях суміші можуть призвести до утворення нерівностей на поверхні. Тому для ущільнення верхніх шарів дорожнього покриття доцільно використовувати цей каток у поєднанні з гладковальцевими катками.

Принципова відмінність вібраційного катка [14], полягає в наявності гнучкої обичайки вальця, всередині якого встановлено кілька опорних роликів і вібробудувач.

Динамічні впливи з боку вібробудувача передаються гнучкій обичайці катка, яка деформується і здійснює ущільнення дорожнього покриття. Завдяки протифазному руху частин обичайки, що мають відносно невелику масу, зникає необхідність у використанні спеціальних засобів для віброзахисту оператора, а металоємність катка знижується на 30% [8]. Водночас, дана конструкція відзначається високим рівнем шуму та складністю у виготовленні, що вказує на потенціал для її подальшого вдосконалення.

Каток з вакуумним пристроєм, що забезпечує безступінчасте регулювання контактних тисків робочих органів на шар суміші, є ще однією інновацією [12]. Вакуумний механізм, розміщений між вальцями катка і з'єднаний з рамою та вакуумним насосом, створює розрідження у камері, що змінює схему навантаження матеріалу від стиснення після проходження першого вальця до

розтягнення. Це прискорює релаксаційні процеси та знижує залишкові напруження у шарі перед наступним стисненням [13]. Такий підхід дозволяє значно прискорити процес ущільнення асфальтобетонної суміші та підвищити її ущільнювальність більш ніж вдвічі. Вакуумування також зменшує залишкову пористість і водонасичення дорожньої поверхні, покращує структуру матеріалу і підвищує однорідність покриття [14]. Незважаючи на всі переваги цих котків, їх серійне виробництво поки що не розпочато.

Сучасні зарубіжні виробники дорожньої техніки також пропонують асфальтобетонні котки з регульованим впливом на ущільнюваний матеріал. Завдяки можливості змінювати амплітуду і частоту коливань робочого органу, машиніст може налаштувати необхідні значення відцентрової сили. Наприклад, котки Dунарас дозволяють проводити ущільнення з частотами 50 Гц і 70 Гц [12], тоді як продукція компанії Caterpillar оснащена п'ятиамплітудною вібраційною системою [19].

Найбільш широкий діапазон налаштувань представлений у дорожній машині Ingersoll Rand DD-90HF, яка має 8 значень амплітуди для кожного з двох частотних режимів [12]. Проте, аналізуючи сучасний ринок ущільнювальної техніки, можна зазначити, що деякі виробники вибрали надто малий крок регулювання параметрів котка, і при частоті коливань 70 Гц та амплітуді 0,39 мм коток стає надмірно динамічним.

Однією з перспективних розробок є система спрямованої вібрації Variomatic від компанії Bomag [16]. У цьому випадку на робочому органі катка встановлюється механізм, що складається з двох паралельних валів з обертовими у протилежному напрямку дебалансами. Це дозволяє безступінчасто регулювати амплітуду коливань, а зміна положення пристрою відносно осі вальця дає змогу змінювати напрямок вектора відцентрової сили.

Схожа конструкція застосовується в котках фірми Hamm [14]. Зміщені на 180° дебаланси, які співнаправлено обертаються, створюють крутний момент

					ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		15

навколо осі робочого органу, що забезпечує вплив на матеріал за схемою «статичне стиснення - реверсивне зрушення».

Однією з важливих переваг таких котків є можливість виконання ущільнення асфальтобетонних сумішей на мостах, шляхопроводах і в інших місцях, де заборонено використання вібраційних технологій [13]. Хоча котки від компанії Hamt використовують комбінацію осциляторного та вібраційного вальців, у деяких дослідженнях зазначається, що якість ущільнення тонких шарів асфальтобетонної суміші цими машинами залишається на низькому рівні [12]. Це пояснюється надмірним динамічним впливом з боку вібраційного робочого органу та недостатньою ефективністю роботи осциляторного вальця, що потребує додаткового ущільнення поверхні статичним гладковальцевим катком.

Загальною проблемою для дорожніх машин з такими робочими органами є підвищений абразивний знос контактної поверхні під час ущільнення матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя. Це спричиняє прослизання вальця і, як наслідок, збільшує кількість необхідних проходів котка [12].

Наукове співтовариство сьогодні активно досліджує концепцію "інтелектуального ущільнення". Вона передбачає оснащення котків датчиками, що фіксують параметри асфальтобетонної суміші, і на основі отриманих даних автоматично регулюють силовий вплив на шар матеріалу. На ринку вже представлені такі системи від провідних виробників, як Ammann, Dynapac, Caterpillar та інші.

Однією з найінноваційніших розробок у сфері інтелектуального ущільнення є система "Асфальт Менеджер" від компанії Bomag [14]. Її програмне забезпечення безперервно контролює стан ущільнюваного шару, вимірюючи температуру суміші та її динамічний модуль деформації, а за допомогою системи Variomatic автоматично регулює амплітуду коливань

					<b>ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ док.ум.	Підп.	Дата		16

вальця.

Аналіз літератури, зокрема дослідження [15], показує значний потенціал застосування катків, оснащених системами інтелектуального ущільнення. Однак на даний момент їх використання не завжди забезпечує потрібну якість ущільнення. Це пов'язано з недостатньо високим рівнем кореляції між вимірними значеннями динамічного модуля деформації та залишкової пористості суміші, що не дозволяє системі правильно оцінювати якісні показники покриття.

Таким чином, аналіз існуючих засобів для ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей свідчить про те, що котки мають обмежену універсальність і недостатній діапазон варіації силових впливів на шар матеріалу, що знижує ефективність їх роботи з точки зору продуктивності та вартості, а також не дозволяє гарантувати належну якість дорожнього покриття.

## 1.2 Вплив ущільнення на фізико-механічні властивості асфальтобетонних сумішей

Асфальтобетонні покриття є найбільш поширеними у світовій практиці дорожнього будівництва. Цей матеріал формується шляхом ущільнення дорожніми котками асфальтобетонних сумішей, що складаються з щебеню, піску, мінерального порошку та бітуму, підібраних у певних пропорціях [17].

Більшість українських і міжнародних досліджень фокусуються на вивченні фізико-механічних властивостей ущільненого асфальтобетону при температурах до 60 °C для покращення його експлуатаційних характеристик [12]. Проте ці дані не дозволяють повністю оцінити змінність характеристик матеріалу під час процесу укочування.

					<b>ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		17

Вагомий внесок у дослідження асфальтобетонних сумішей під час ущільнення та виявлення чинників, що впливають на їх міцнісні та деформативні властивості, зробили роботи Горелишева Н.В., Рибьева І.А., Сахарова П.В., та інших дослідників [13, 16]. Проте, через багатокomпонентну структуру, асфальтобетон залишається одним з найскладніших дорожніх матеріалів, де властивості кожного компоненту впливають на характеристики кінцевого покриття.

У теорії, запропонованій Сахаровим П.В., структура матеріалу ділиться на асфальтове в'язуче, що включає бітум і мінеральний порошок, та мінеральний кістяк, який складається з піску і щебеню.

На думку Гезенцевя Л.Б., мінеральний порошок є частиною мінерального кістяка, тоді як Рибьев І.А. виділяє різні процеси, що відбуваються при формуванні асфальтобетону, розділяючи матеріал на мікро- та макроструктури.

Макроструктуру асфальтобетону формує мінеральний кістяк, який характеризується структурою складових матеріалів, щільністю, що визначає деформативні властивості в широкому температурному діапазоні, та величиною внутрішнього тертя. Мікроструктура включає в себе бітум, який взаємодіє з мінеральним порошком (рисунок 1.5).

На поверхні мінерального порошку утворюються коагуляційні зв'язки, що сприяють формуванню просторової структури асфальтобетону. Оскільки бітум має певні тиксотропні властивості, опір асфальтобетонної суміші при ущільненні значно зменшується при використанні вібрації.

Під час процесу ущільнення, в результаті багаторазових циклічних впливів з боку робочих органів, відбувається взаємне переміщення елементів мінерального скелета, що супроводжується збільшенням об'ємної маси суміші та зменшенням її пористості, завершуючи формування макроструктури

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

асфальтобетону.

Основні фізико-механічні характеристики матеріалу, такі як модуль деформації, межа міцності, зчеплення і кут внутрішнього тертя, визначаються взаємодією між його компонентами. Вивчення закономірностей змін характеристик міцності та деформаційних показників під час ущільнення дозволить встановити оптимальні режими укатки суміші та забезпечити структуру асфальтобетону з необхідними експлуатаційними властивостями.

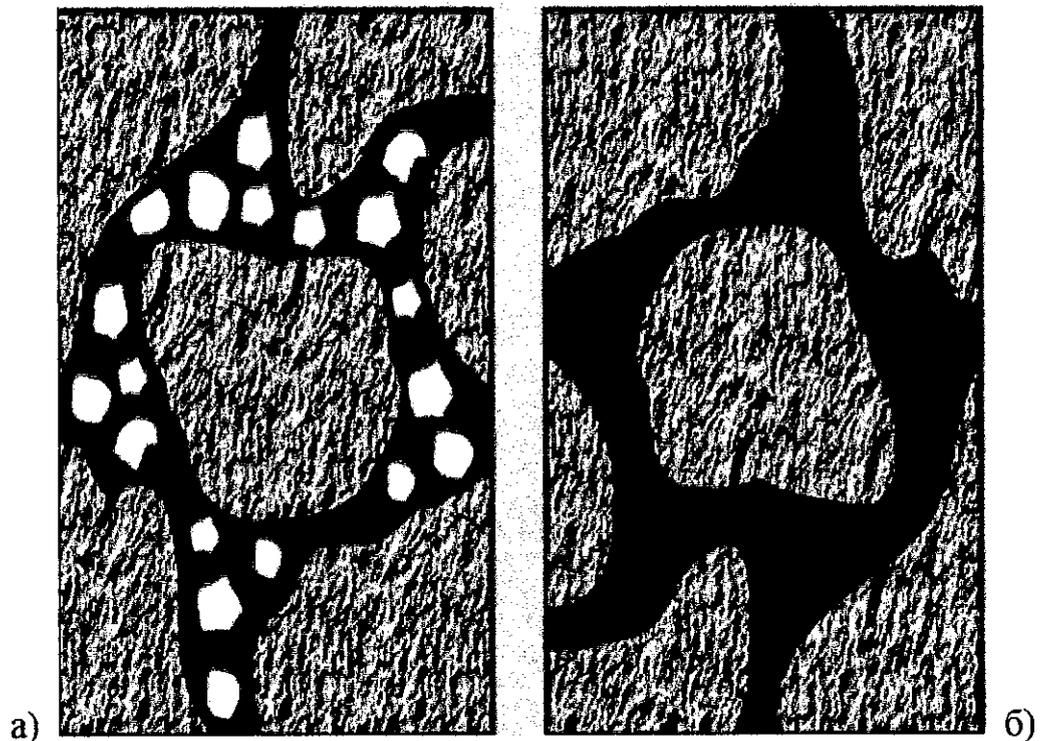


Рисунок 1.5 – Асфальтобетон

Асфальтобетон належить до пружно-в'язко-пластичних матеріалів [10]. В процесі укатки асфальтобетонних сумішей можуть виникати пластична, умовно-пружна і пружна деформації. Співвідношення між цими деформаціями та їх характер залежать як від властивостей матеріалу, так і від параметрів ущільнення. На початковому етапі переважають пластичні деформації, які

поступово змінюються пружними в міру просування процесу укатки.

Накопичення необоротних пластичних деформацій дозволяє досягти необхідної щільності суміші, але цей процес може тривати навіть після досягнення цієї мети, якщо контактний тиск перевищує несучу здатність шару. Така деформація розвивається без зміни обсягу суміші, викликаючи порушення цілісності матеріалу та утворення дефектів дорожнього покриття. Пружні та умовно-пружні деформації є оборотними, тобто відновлюються після зняття навантаження з матеріалу. Пружна складова виникає через деформацію мінерального скелета суміші і не залежить від тривалості ущільнювального впливу. Умовно-пружна деформація розвивається через переміщення в'язучого і повітря, що знаходиться в порах, та залежить від таких чинників, як температура і щільність суміші, а також від часу дії навантаження.

Комплексним показником, який відображає всі складові деформації асфальтобетонної суміші, є модуль деформації. Цей параметр також характеризує можливість матеріалу до ущільнення, що робить його вивчення важливим з наукової точки зору. Знання про процеси, які відбуваються під час укатки дорожнього покриття, дозволяє вдосконалити цей процес, скоротити час укатки і зменшити витрати на будівництво доріг.

					ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		20

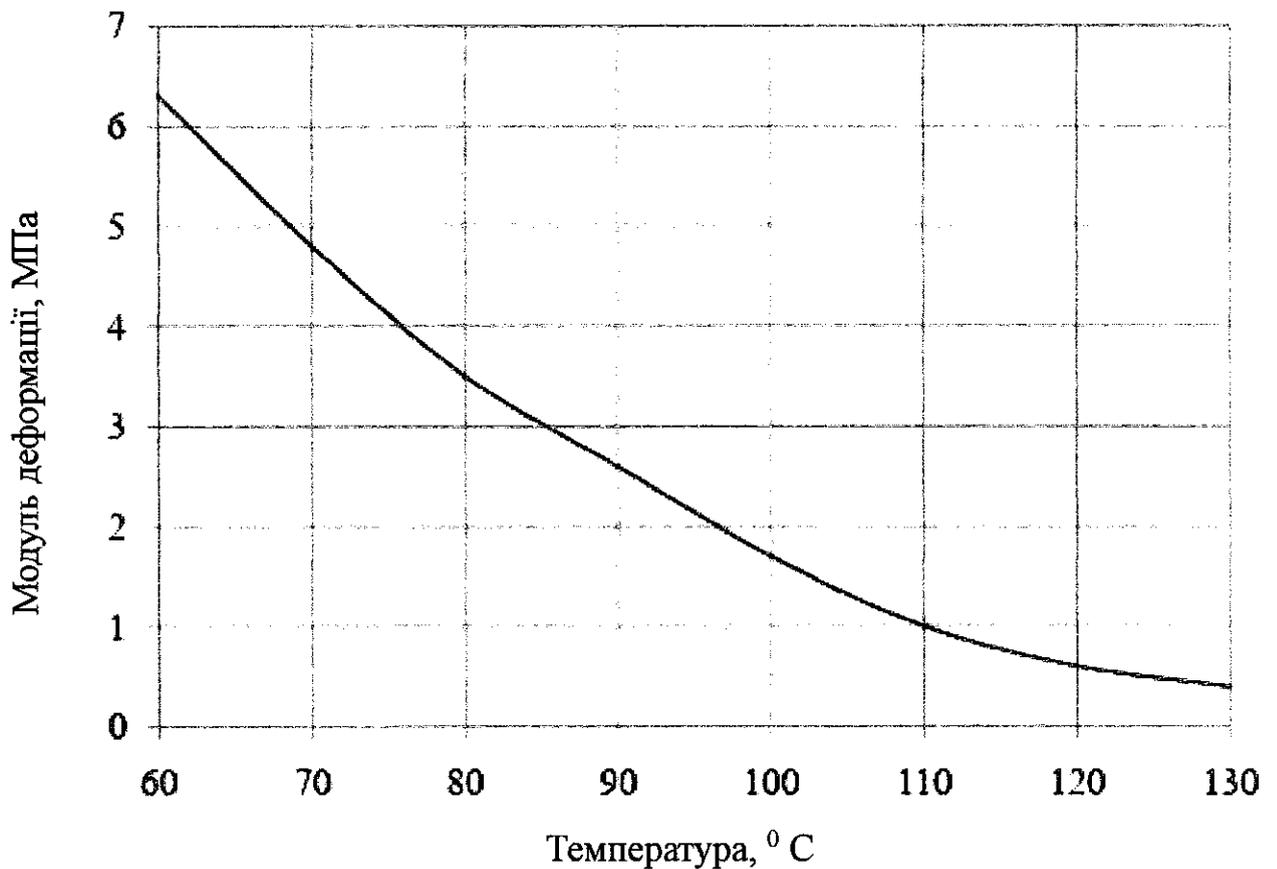


Рисунок 1.6 – Графік залежності модуля деформації асфальтобетонної суміші від температури

Дослідження деформаційних властивостей піщаної асфальтобетонної суміші проводив Зубков А.Ф. [15]. Отримана залежність модуля деформації матеріалу від температури має експонентний характер, що підтверджується результатами досліджень інших авторів. У розглянутому температурному діапазоні спостерігається шестикратне збільшення вимірюваної величини, що є в межах допустимих значень.

Сергеева Т.Н. [4] провела дослідження для встановлення закономірності зміни модуля деформації при збільшенні коефіцієнта ущільнення асфальтобетонної суміші в широкому температурному діапазоні. Деформування зразків проводилося в металевих формах, що запобігало їх бічному розширенню. На основі результатів випробувань, представлених на

Рисунку 1.7, було встановлено лінійну залежність між щільністю матеріалу і модулем деформації при коефіцієнті ущільнення понад 0,9. При нижчих значеннях щільності вплив цього параметра на деформаційні властивості суміші є менш виразним.

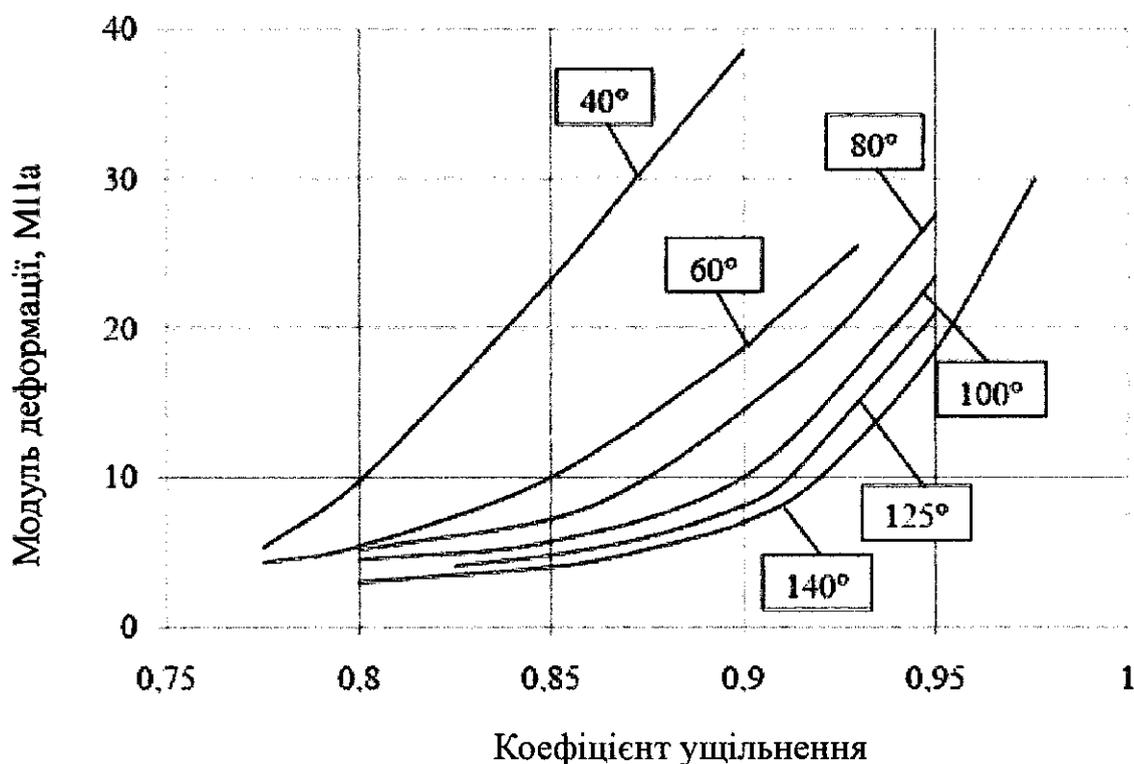


Рисунок 1.7 – Залежність модуля деформації асфальтобетонної суміші від коефіцієнта ущільнення.

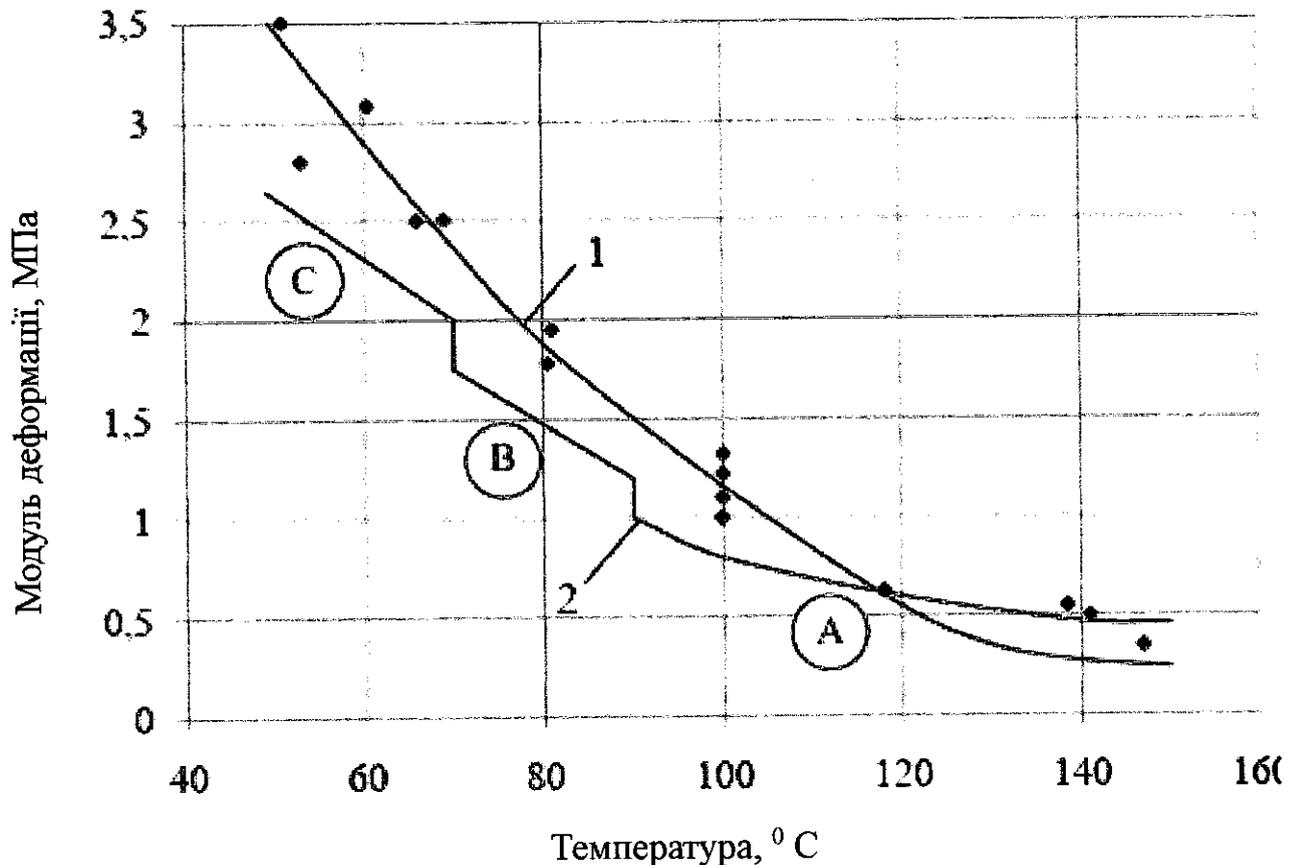
В дослідженні Костельова М.П. [3] зазначено, що на модуль деформації та межу міцності суміші впливають як температура, так і її щільність. Спираючись на експериментальні дані Хархута М.П. та Пермякова В.Б., автор зазначає, що під час ущільнення завдяки сумарному впливу обох факторів модуль деформації збільшується в 15-20 разів, а межа міцності – в 4 рази, що підкреслює важливість визначення щільності суміші при виборі режимів укатки. Дослідження показують, що інтенсивність зростання модуля деформації асфальтобетонної суміші при зниженні температури значно

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

перевищує ступінь збільшення її межі міцності. Штампові випробування [14] показали, що зниження температури з 100 °С до 70 °С спричиняє збільшення модуля деформації в 5 раз, а межі міцності лише в 3 рази.

В інших роботах [8] відзначається, що комплексний показник деформації матеріалу збільшується в 9 разів за аналогічних умов.



1 – межа міцності матеріалу; 2 – максимальні напруження під вальцями котків;

А – ДУ-47; В – ДУ-48; С – ДУ-49А.

Рисунок 1.8 – Залежність межі міцності асфальтобетонної суміші та максимальних контактних тисків від температури:

В роботі [18] було досліджено залежність між межею міцності і максимальними тисками під вальцями котків від температури під час ущільнення

щербенистих сумішей. Результати, представлені на рисунку 1.8, є орієнтовними, але підтверджують ризик перевищення допустимих контактних тисків на шар асфальтобетонної суміші з боку робочих органів котка, особливо на початкових етапах ущільнення.

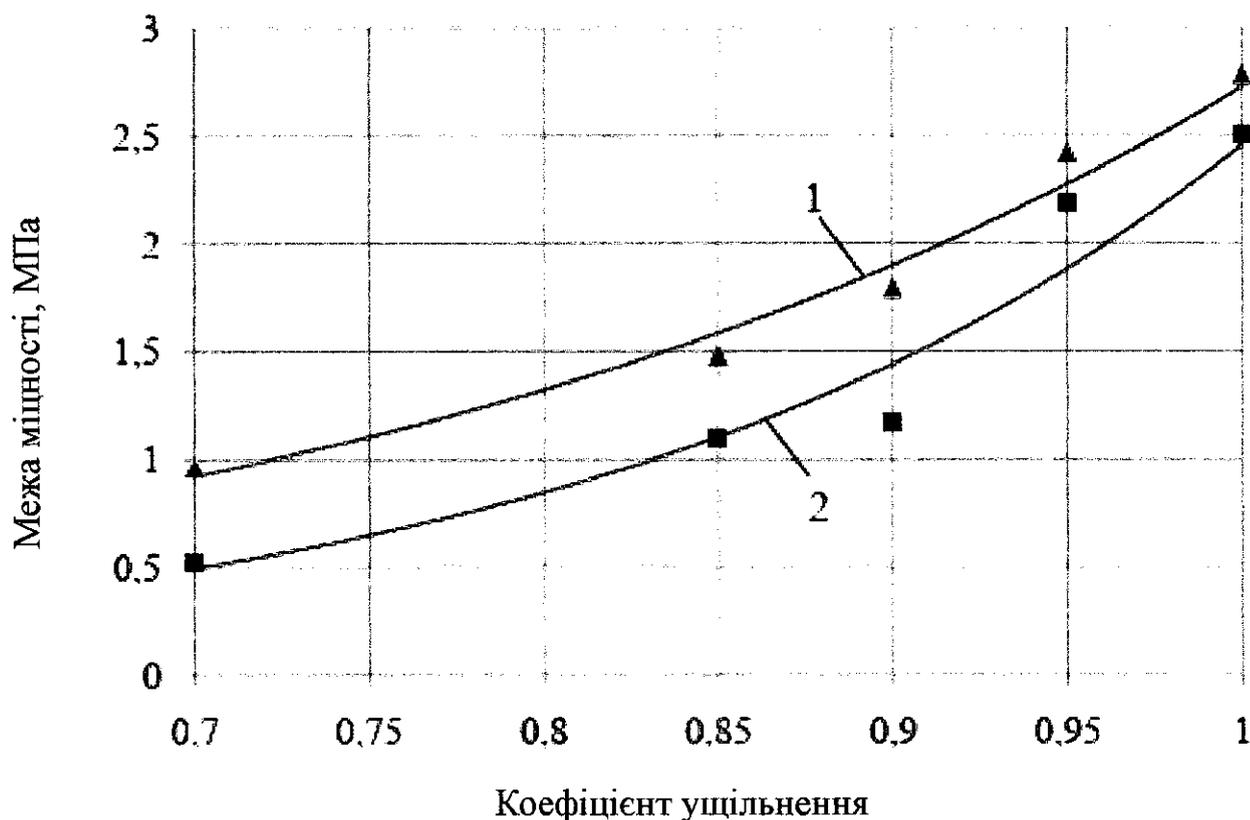
Було встановлено, що підвищення щільності та зниження температури в малощербенистих асфальтобетонних сумішах призводить до збільшення еквівалентного модуля деформації в 15 разів та межі міцності в 10 разів. На основі представлених даних можна припустити, що збільшення вмісту щебеню у складі суміші сприяє зниженню темпів зростання межі міцності в процесі ущільнення.

Дослідження, присвячені впливу швидкості деформування, щільності та температури асфальтобетонних сумішей на опір ущільнення, були проведені в роботах [6,8]. На рисунку 1.9 наведено результати, що демонструють зміни коефіцієнта ущільнення та межі міцності асфальтобетонних сумішей типу А та Б, отримані шляхом апроксимації певних значень автором.

Виявлено, що характеристики міцності обох типів сумішей синхронно збільшуються в 2-3 рази залежно від коефіцієнта ущільнення в діапазоні щільності, характерному для використання дорожніх ковзанок. Водночас, вплив цього фактора на межу міцності є менш вираженим порівняно з модулем деформації, що підкреслює необхідність щільного компонування складових суміші для формування просторової структури асфальтобетону.

Дослідження, представлені в роботі [7], демонструють зв'язок між температурою, складом суміші та ефективністю ущільнення. Залежності, показані на рисунку 1.10, вказують на вплив вмісту щебеню на ущільненість суміші та наявність оптимальної температури укатки, при якій затрати на ущільнення мінімальні. На початковій стадії укатки спостерігається розущільнення суміші через занадто низьку в'язкість матеріалу при високих температурах, що призводить до збільшення енерговитрат на укочування покриття.

При температурах нижче 90 °С також потрібні підвищені зусилля для досягнення необхідної щільності через збільшення модуля деформації суміші. В останні роки в нашій країні спостерігається значне зростання використання нових видів асфальтобетонних сумішей і різноманітних добавок, які істотно впливають на властивості матеріалу. Найбільшого поширення серед них набули щебенево-мастильні асфальтобетонні суміші та асфальтобетони на основі полімерно-бітумних в'яжучих, завдяки перевагам основних експлуатаційних характеристик цих матеріалів над традиційними.

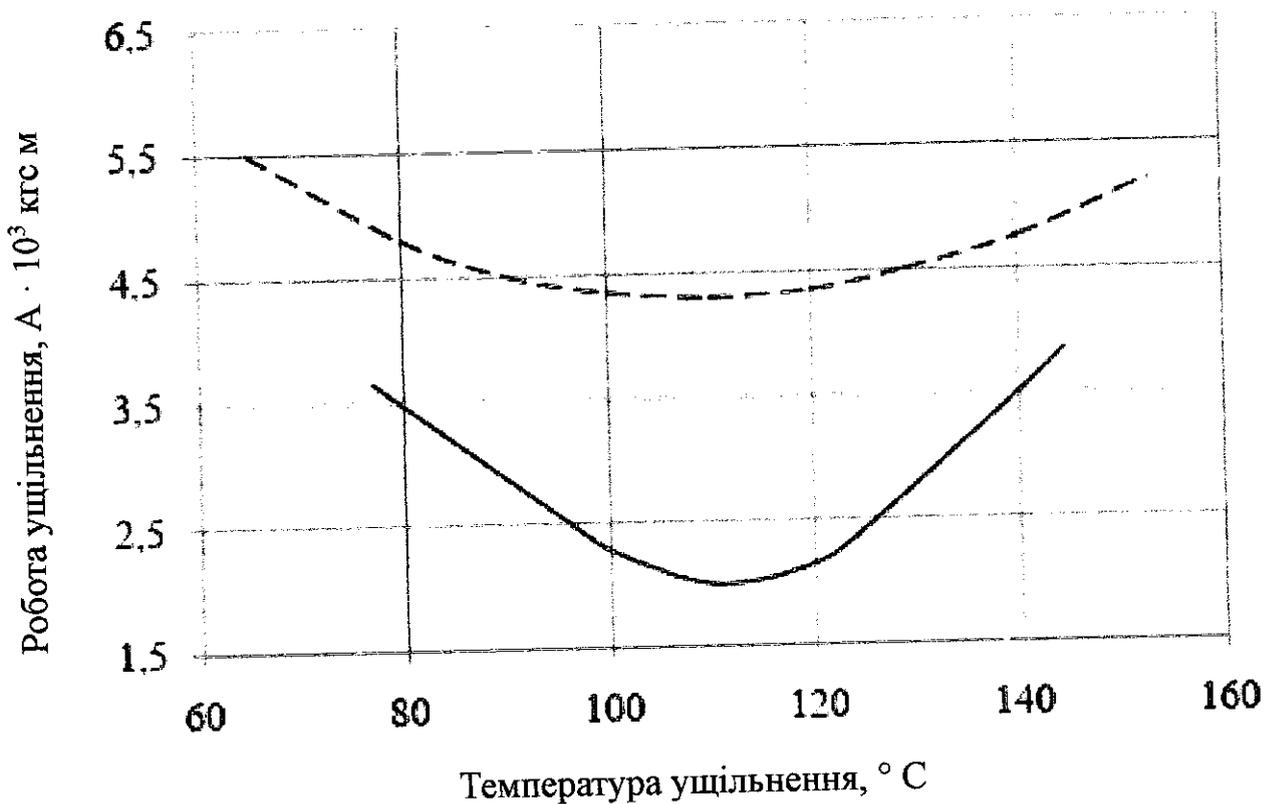


1 - суміш типу А; 2 - суміш типу Б.

Рисунок 1.9 – Залежність межі міцності суміші від коефіцієнта ущільнення:

Аналіз змін властивостей робочого середовища дорожніх котків під час укатки дозволяє зробити висновок про важливість модуля деформації та межі міцності для ефективного ущільнення матеріалу. Це підкреслює необхідність

встановлення закономірностей процесу взаємодії робочих органів машин із сумішшю для досягнення оптимальної структури асфальтобетону з потрібними експлуатаційними якостями та інтенсифікації процесу ущільнення.



1 — вміст щебеню 30%, 2 - - - вміст щебеню 50%

Рисунок 1.10 — Залежність роботи ущільнення від температури суміші.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист  
25

## 2 Ущільнення асфальтобетонної суміші вібраційним котком

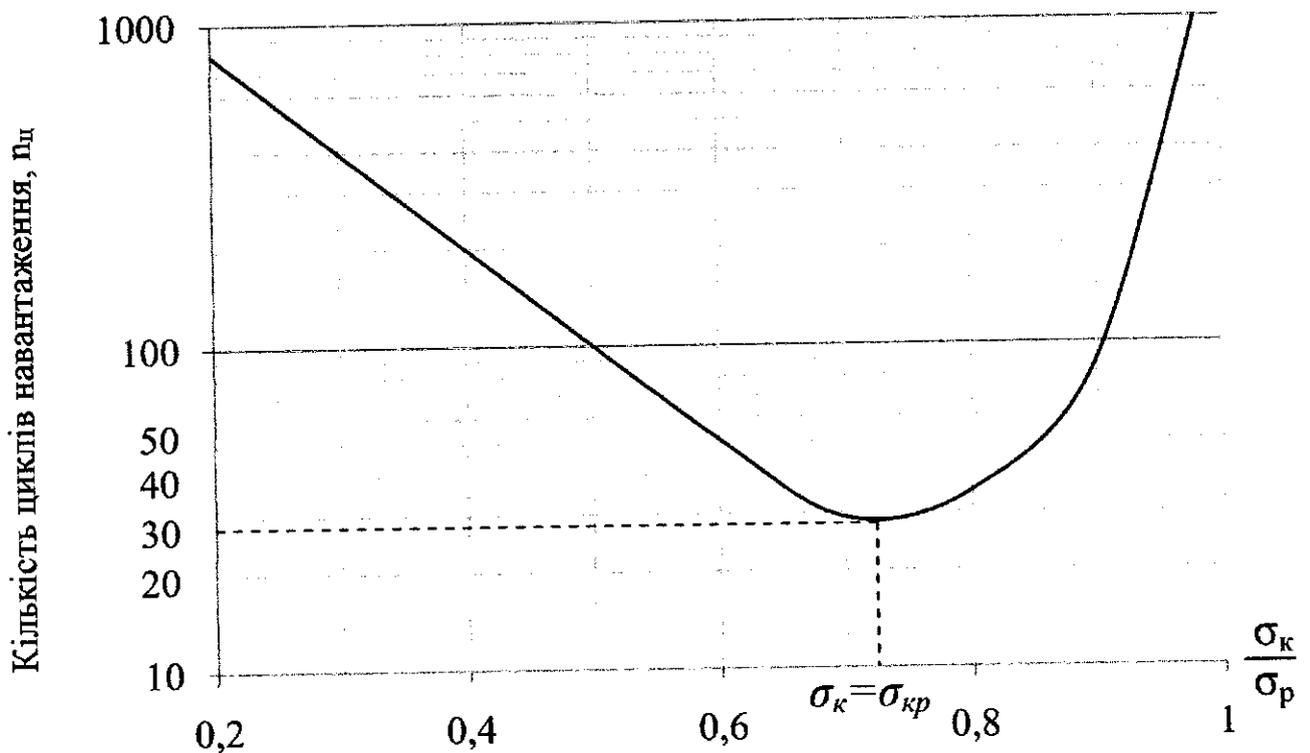
### 2.1 Аналіз технологій ущільнення асфальтобетону

Залежність фізико-механічних властивостей асфальтобетонних сумішей від температури підкреслює важливість виконання укатки в строго визначеному температурному діапазоні для досягнення оптимального ущільнення матеріалу. Відповідно до досліджень [4], укочування повинно здійснюватися при температурах від 140 до 70 °С. Однак швидке охолодження матеріалу створює значні часові обмеження для цієї операції, що вимагає від дорожніх котків високих вимог до ущільнюючої здатності та технологічної ефективності.

При виборі параметрів котків і режимів навантаження важливо постійно контролювати величину силового впливу, що надається робочим органом на ущільнювальний матеріал. Якщо значення силового впливу занадто високі, це може призвести до порушення цілісності асфальтобетону, утворення хвиль та тріщин. У разі недостатніх контактних тисків зростає ймовірність недостатнього ущільнення шару суміші.

Таким чином, відхилення від оптимальних значень силових впливів може значно погіршити рівність та довговічність дорожнього покриття, а також знизити продуктивність робіт. Через неможливість досягнення необхідної щільності суміші шляхом нескінченного збільшення навантажень, для досягнення мети необхідно використовувати технологічні схеми укатки, що включають багаторазове проходження катка по одному сліду. Залежність необхідної кількості циклів навантаження від співвідношення контактних тисків робочого органу і межі міцності матеріалу показана на рисунку 2.1:

				<b>ГМiМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>			
<b>Зм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підп.</b>	<b>Дат</b>	<b>Літ.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листів</b>
Розроб.		Кричинський			Н	27	
Перев.		Коробко		23.08	Ущільнення асфальтобетонної суміші вібраційним котком Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Керівник		Коробко		23.08			
Н. контр.		Васильєв		23.08			
Затв.		Орисянко		26.08			



Відношення контактних тисків до межі міцності

Рисунок 2.1 – Залежність необхідної кількості циклів навантаження від співвідношення контактних тисків і межі міцності асфальтобетонної суміші.

Згідно представлених даних, найменша кількість проходів дорожнього катка і, як наслідок, найбільша ефективність процесу укатки досягається при ущільненні з контактними тисками, що наближаються до критичних для конкретного типу та стану асфальтобетонної суміші. Критичний силовий вплив визначається як навантаження, перевищення якого може призвести до руйнування ущільнюваної поверхні. Рекомендовані значення критичних силових впливів на шар наведені в [27]:

$$\sigma_{kr} = (0,9 - 1,0) \cdot \sigma_p \quad (2.1)$$

де  $\sigma_{kr}$  – критичне напруження, Па;

$\sigma_p$  – межа міцності асфальтобетонної суміші, Па.

Однак у деяких випадках при ущільненні верхніх шарів асфальтобетонних покриттів силові впливи, що здійснюються дорожнім катком відповідно до цих рекомендацій, можуть перевищувати межу міцності суміші, що призводить до виникнення поверхневих дефектів.

Для уникнення подібних проблем, пропонується знижувати величину силових впливів на 25% через часті перевантаження шару суміші.

$$\sigma_{кр} = (0,65 - 0,75) \cdot \sigma_p \quad (2.2)$$

Зміна міцності дорожньої поверхні під час укатки вимагає визначення критичних напружень для досягнення оптимального ущільнення асфальтобетонної суміші. Для цього необхідно встановити залежність між межею міцності суміші, її щільністю і температурою.

Отримані значення критичних напружень потрібно порівняти з контактними тисками під робочим органом дорожнього катка. На основі теорії Герца-Беляєва, яка аналізує напруження під час перекочування циліндра по рівній поверхні [19], була розроблена формула для обчислення максимальних тисків під рухомим вальцем асфальтобетонного катка:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{qE_0}{R}} \approx 1,4 \sqrt{\frac{Q_b \cdot E_0}{BD}}, \quad (2.3)$$

Де  $\sigma_{max}$  – максимальні контактні тиску, Па;

$q$  – питомий лінійне тиск, Н / м;

$E_0$  – модуль деформації матеріалу, Па;

$Q_b$  – статична сила впливу робочого органу катка на ущільнюваний шар, Н;

$B$  – ширина вальця, м;

$R, D$  – радіус і діаметр вальця відповідно, м.

Результати розрахунків контактних тисків за формулою (2.3) показали

високу відповідність із реальними даними, особливо добре описуючи процес ущільнення різних грантових матеріалів дорожніми катками.

Проте, ця залежність має суттєві недоліки. Зокрема, у формулі не враховується товщина шару матеріалу, що ущільнюється, що може призводити до однакових значень контактних тисків у шарах різної товщини. Зважаючи на вплив різної осадки шарів суміші [15], була розроблена нова формула для розрахунку контактних тисків під робочим органом дорожнього катка, яка враховує ці фактори:

$$\sigma_k = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 \cdot E_0}{B^2 D h}}, \quad (2.4)$$

де  $h$  - товщина шару, м.

При використанні вібраційного методу ущільнення асфальтобетонної суміші в рівнянні (2.4) необхідно враховувати динамічну силу  $F_d$ , яка протягом одного робочого циклу може змінюватися в межах від 60% до 140% від амплітуди вимушених коливань  $F_v$ . Тому для розрахунків зазвичай використовують середнє значення цієї сили, яке відповідає середній фазі ущільнення, тобто  $F_{ср}$ .

Призначення катка з оптимальними значеннями контактних тисків є досить складним завданням через криволінійність поверхні робочого органу ущільнювальної машини та постійно змінювану площу її контакту з матеріалом. Ця площа залежить як від діаметра і ширини вальця, так і від величини його проникнення в асфальтобетонну суміш. Тому для оцінки ущільнювальної здатності дорожніх катків і їх порівняння між собою, запропоновано використовувати контактні тиски на одиничному шарі з одиничним модулем деформації  $E_0$ .

$$p_k = \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 \cdot \Delta_E}{B^2 D \Delta h_k}}, \quad (2.5)$$

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

де  $\Delta_E = 1$  –модуль деформації, Па;

$\Delta h = 1$  – товщина шару, м.

Для визначення динамічних контактних тисків на одиничному шарі замість статичної сили впливу робочого органу котка необхідно використовувати її динамічний аналог. Основна перевага показників та полягає в тому, що для їх розрахунку використовуються лише паспортні дані ущільнювальної машини. Завдяки цим показникам можливо оцінити ефективність катків різного розміру та маси.

Зважаючи на безперервність змін характеристик міцності та деформативних властивостей асфальтобетонної суміші під час процесу ущільнення, необхідно здійснювати пропорційне збільшення силового впливу на дорожню поверхню з боку робочого органу машини. Для встановлення раціональних режимів ущільнення дорожнього покриття слід моделювати процес взаємодії вальців катка із шаром суміші.

Для досягнення максимальної ефективності ущільнення катки повинні мати здатність до плавної зміни контактних тисків під робочими органами протягом усього процесу укатки. Це пояснює розвиток різноманітності дорожніх машин, які постійно збільшуються за масою і габаритами.

Широкий спектр вимог до засобів ущільнення та варіювання їх контактних тисків, викликаний застосуванням різних складів, типів і марок сумішей, зміною товщини шарів, що ущільнюються, а також погодними умовами і температурою, зумовлює потребу в застосуванні комплекту асфальтобетонних катків, здатних забезпечити різні силові дії на шар.

Через низьку універсальність існуючих котків, традиційна технологія ущільнення асфальтобетонних сумішей передбачає поступове введення в роботу дорожніх машин різного типу під час укатки. У міру виконання необхідної кількості проходів, після яких подальший вплив на матеріал стає неефективним,

здійснюється заміна котка іншим, з більш високими силовими параметрами. Для кожного типу асфальтобетонних катків, відповідно до створюваного ущільнюючого впливу, визначено раціональні температурні діапазони їх застосування.

Процес укатки гарячої асфальтобетонної суміші можна уявити за допомогою графіка, наведеного на рисунку 2.2. На осі ординат відображена температура ущільнюваної суміші, а на осі абсцис — силовий параметр дорожнього катка  $(F_k)$ , який відповідає контактному тиску під вальцем катка. Основні лінії на графіку показують діапазон застосування відповідно до традиційної технології ущільнення, а пунктирні лінії демонструють найбільш раціональний режим укатки покриття.

На першому етапі ущільнення використовується легкий каток з початковим контактним тиском, який не перевищує межу міцності суміші. У процесі ущільнення цей показник матеріалу значно зростає порівняно з початковим значенням через збільшення щільності і зниження температури, тоді як контактний тиск під вальцем дорожньої машини збільшується лише незначно через зменшення площі контакту робочого органу з покриттям.

Оскільки легкий каток не здатен забезпечити достатній силовий вплив для досягнення необхідного рівня ущільнення матеріалу, виникає потреба у його заміні на більш важку дорожню машину, яка забезпечить відповідний контактний тиск. Подібним чином здійснюється заміна катків середнього типу на важкий, що дозволяє досягти необхідного рівня ущільнення покриття на завершальних етапах укатки.

Застосування цієї технологічної схеми укатки має значні складнощі, зокрема у визначенні оптимального часу для задіяння катка, початкових робочих параметрів, кількості необхідних проходів по одному сліду, а також моменту переходу на іншу ущільнювальну машину з більшим силовим впливом. Важливо також забезпечити безперервний рух катків у напрямку до

асфальтоукладача, що ускладнюється через застосування човникової схеми роботи ущільнювальної техніки і одночасного використання декількох типів машин. Висока залежність від людського фактора і необхідність ретельної організації роботи різних ковзанок в умовах обмеженого простору створюють значні труднощі, що можуть негативно впливати на якість і продуктивність укатки.

Сучасні дорожні котки, які здатні регулювати такі параметри, як амплітуда та частота коливань, дещо розширили можливості використання вібраційних методів ущільнення. Проте, через обмежену можливість варіювання навантаження і відсутність універсальності у цих машин, досі зберігається потреба в застосуванні різноманітних машин для укатки покриття. Найбільша ефективність цього процесу досягається за умови використання дорожнього котка, який здатен забезпечити ущільнення на всіх етапах укатки, а також при оптимальному виборі режиму його роботи.

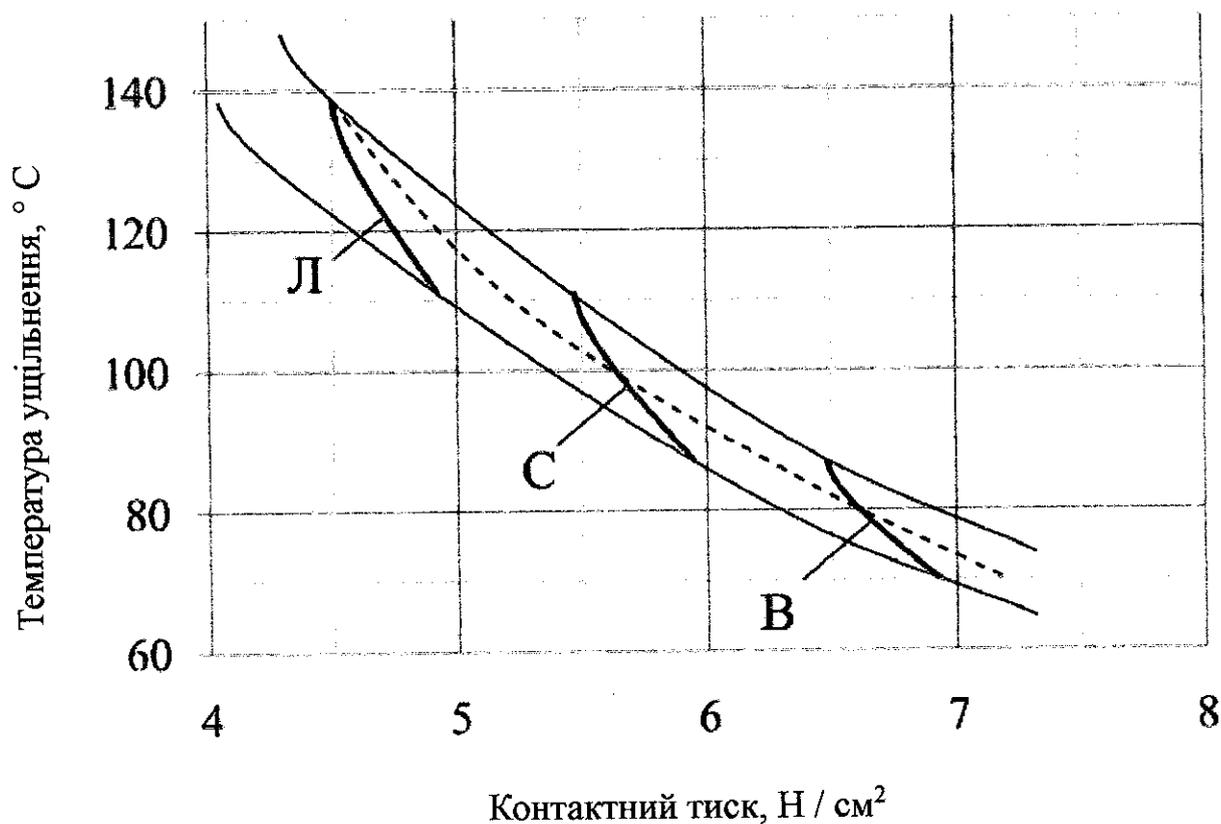


Рисунок 2.2 – Технологічна схема укатки суміші ланкою дорожніх котків

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

33

Іншою важливою характеристикою асфальтобетонної суміші, яка потребує додаткової уваги при укатці, є нерівномірне охолодження матеріалу по ширині дорожнього покриття. Щоб досягти однорідності щільності по всій ширині покриття, ущільнення необхідно починати з краю шару асфальтобетонної суміші, поступово зміщуючи робочу ділянку з перекриттям попереднього сліду в напрямку до середини, як це показано на рисунках 2.3 та 2.4.

Зважаючи на те, що перекриття визначаються операторами катків вручну, синхронізація роботи різних машин всередині однієї ланки стає ще складнішою. На сучасному етапі активно впроваджуються супутникові системи з використанням GPS, які відстежують кількість проходів катка по сліду та надають машиністу інформацію про положення інших ущільнювальних машин. Проте такі системи на даний момент тільки полегшують управління катком під час укатки гарячих асфальтобетонних сумішей, але не забезпечують повну автоматизацію процесу.

Значне підвищення продуктивності можливе при використанні дорожніх котків з функцією повороту вальця. Шарнірне з'єднання робочих органів дозволяє значно покращити маневреність машини та досягти бокового зміщення вальців до 1,3 м один відносно одного, що практично вдвічі збільшує ширину захоплення.

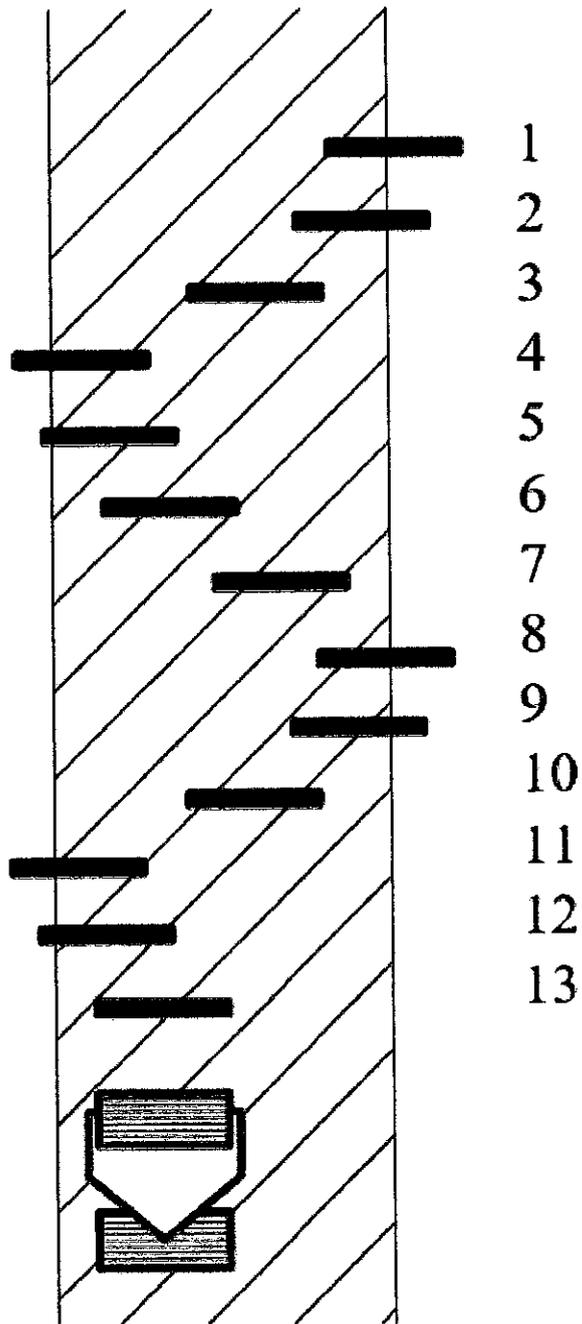


Рисунок 2.3 – Схема перекриття слідів катка в процесі укатки суміші.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМiМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

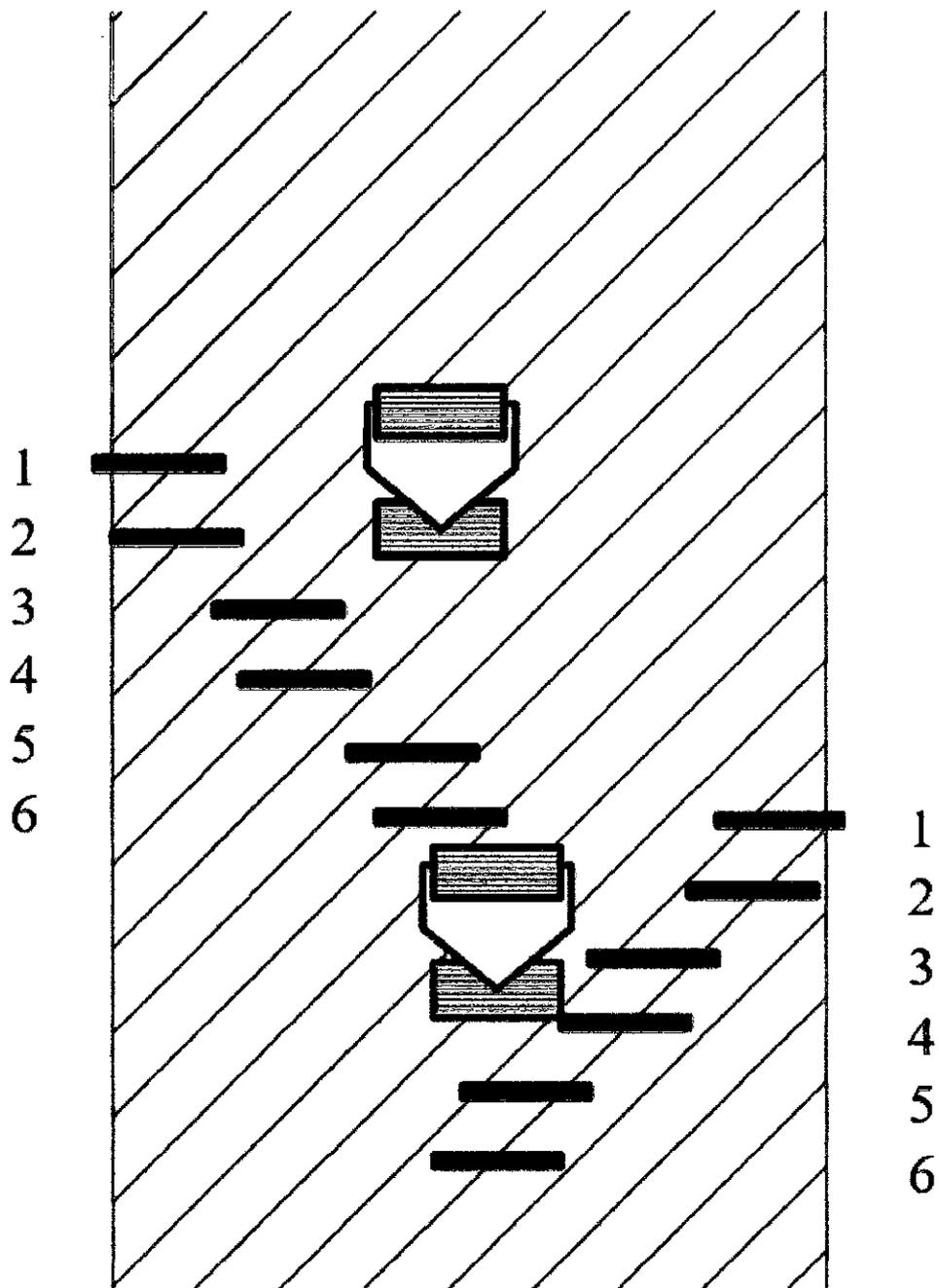


Рисунок 2.4 – Схема перекриття слідів катків в процесі укатки суміші двома машинами.

При створенні технологічної карти для укатки асфальтобетонної суміші необхідно враховувати також потребу в проведенні технологічних маневрів окремих ущільнювальних машин, а також можливість виникнення затримок і різних перешкод у процесі роботи через велику кількість задіяної дорожньої

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

36

техніки.

Таким чином, через обмежену універсальність сучасних ущільнювальних машин, труднощі організації їх спільної роботи в складі однієї ланки, а також через високий вплив людського фактора на процес укатки, існуючі дорожні котки виявляються неефективними і не забезпечують належної якості дорожнього покриття. Це підкреслює необхідність і доцільність розробки нового багатофункціонального котка, який міг би підвищити продуктивність та знизити витрати на процес укатки.

Метою даної роботи є дослідження методів розрахунку параметрів багатофункціонального котка з метою підвищення ефективності ущільнення асфальтобетонних дорожніх покриттів.

## 2.2 Визначення взаємодії котка із сумішшю яка ущільнюється

Розрахунок параметрів засобів ущільнення та встановлення оптимальних режимів укатки гарячих асфальтобетонних сумішей потребує глибокого дослідження закономірностей взаємодії вальців котків з дорожнім покриттям. Напружено-деформований стан, що виникає внаслідок силового впливу робочих органів на шар суміші, залежить як від характеру прикладеного навантаження, так і від фізико-механічних властивостей матеріалу.

Зміна силового впливу на шар, викликана зменшенням величини контактної площі та збільшенням реальної амплітуди коливань, різнофункціональні властивості асфальтобетонної суміші, а також безперервне зростання міцності й деформативних показників матеріалу під час укатки значно ускладнюють математичний опис процесу ущільнення.

Широке поширення для вирішення подібних завдань отримав підхід, що

Лист	№ докум.	Підп.	Дата	

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

37

полягає в заміні фізичних процесів певними розрахунковими моделями, які мають характеристики, близькі до реальних, і описуються відомими математичними законами. Детальний аналіз всіх взаємодій дозволяє підвищити точність отриманої моделі, але також призводить до ускладнення застосовуваного математичного апарату. Тому часто доводиться вдаватися до ідеалізації властивостей асфальтобетонної суміші та певного спрощення постановки задачі, що збільшує відхилення результатів розрахунку від реальних значень фізичних величин.

Модель взаємодії робочих органів вібраційного котка з асфальтобетонною сумішшю представлена на рисунку 2.5. У запропонованій моделі враховується як динаміка елементів ущільнювальної машини під час укатки шару, так і реологічні процеси, що відбуваються в матеріалі.

Ця узагальнена модель може бути розділена на дві складові: коливальну систему «привантажувач – віброралець» і реологічну модель асфальтобетонної суміші, що дозволяє значно спростити математичний опис поведінки кожної з них під час ущільнення. Тоді коливальний рух першої підмоделі буде характеризуватися наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c(x_1 + x_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c(x_1 - x_2) = Q \cdot \sin \omega t + m_2 \cdot g - P(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

де  $m_1$  – маса привантажувача катка, кг;

$m_2$  – маса робочого органу, кг;

$b$  – коефіцієнт в'язкого тертя амортизаторів, Па с;

$x_1, x_2$  – переміщення у вертикальній площині пригруза і вальца відповідно, м;

$c$  – жорсткість амортизаторів, Н / м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м / с<sup>2</sup>;

$Q$  – обурює сила, Н;

$t$  – час коливання, с;

$\omega$  – кутова частота вала вібробудника, рад / с;

$P(t)$  – реакція, яка надається з боку ущільнюється матеріалу, Н.

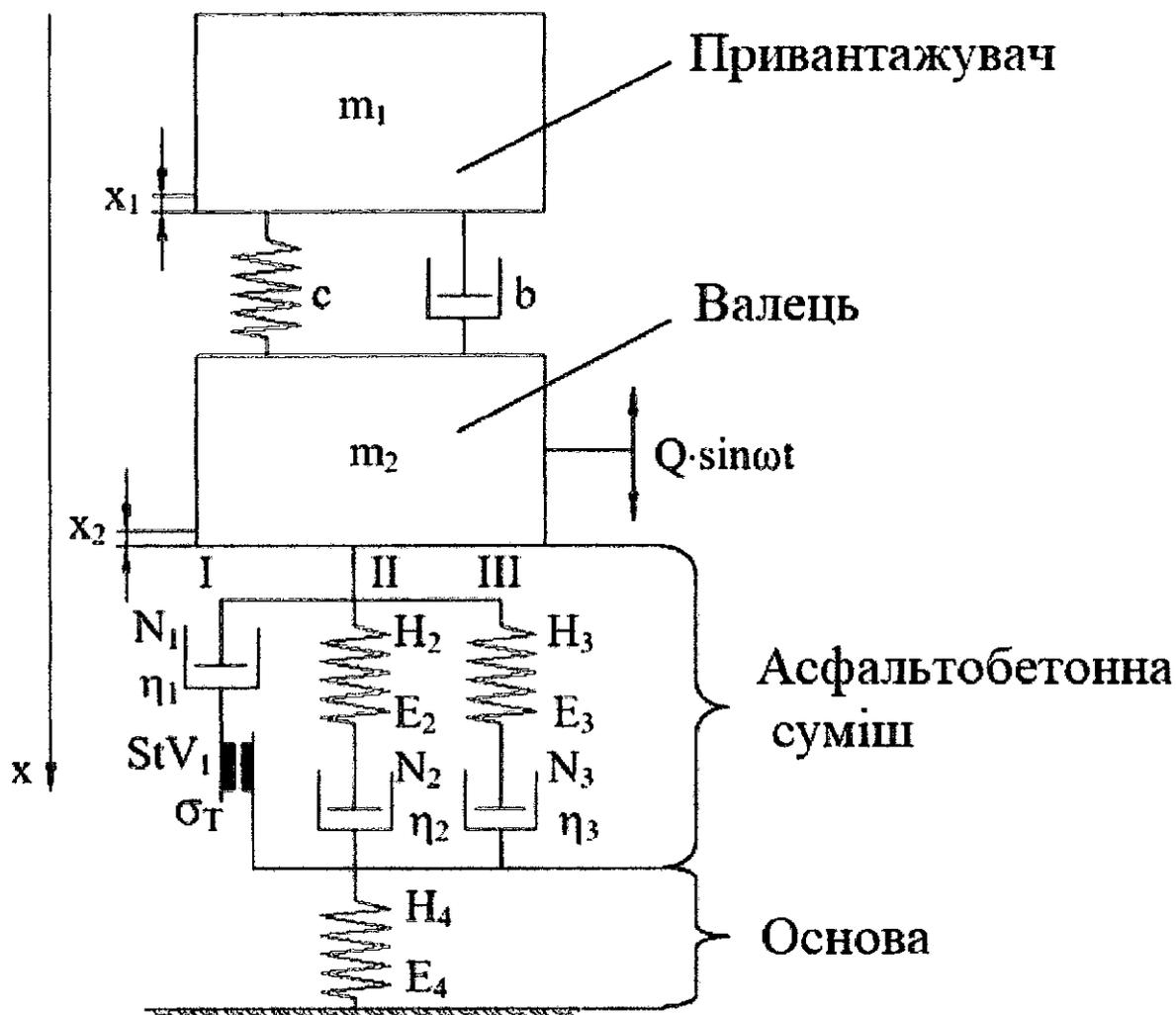


Рисунок 2.5 – Модель взаємодії вальців вібраційного катка з асфальтобетонної сумішшю

Склавши між собою рівняння в системі (2.6), а також використовуючи вирази для площі плями контакту  $F_k(t) = L_{AB}(t) \cdot B$  і напруженням під вальцем

котка  $\sigma_k(t) = \frac{P(t)}{F(t)}$ , можна отримати співвідношення між деформацією шару і

контактним тиском під робочим органом для першої підмоделі:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot \sin \omega t - \frac{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot \frac{d^2 \cdot \varepsilon}{dt^2} \quad (2.7)$$

де  $\sigma_k$  – контактний тиск під вальцом, Па;

$\varepsilon$  – відносна деформація, рівна частці від ділення абсолютної деформації  $x(t) = e \cdot (t)$  на товщину шару  $h(t)$ ;  $L_{AB}(t)$  – довжина дуги контакту вальца з ущільнючим шаром, що розраховується за формулою:

$$L_{AB}(t) = \frac{\pi \cdot R}{180} \cdot \arccos \frac{R - \Delta e}{R} \quad (2.8)$$

де  $\Delta e$  – приріст абсолютної деформації шару після одного проходу, м.

У свою чергу, реологічна модель ущільнення складається з трьох паралельно з'єднаних блоків, які відображають пружно-в'язко-пластичні властивості шару асфальтобетонної суміші та релаксаційні процеси, що протікають у ньому. Робота четвертого блоку, який представляє собою тіло Гука і імітує основу дорожнього покриття, через високу жорсткість останнього в дослідженнях авторів не розглядається.

Пластичні деформації матеріалу враховуються за допомогою елемента Сен-Венана, який деформується при напруженнях, що перевищують межу текучості суміші, при цьому в'язкий елемент першого блоку залишається незадіяним у роботі.

Моделі Максвелла в блоках II і III відображають, відповідно, "швидку" і "повільну" релаксацію напружень. Швидкоплинна частина спектра релаксації виникає через взаємне переміщення великих елементів мінерального скелета суміші, розділених маломіцними бітумними плівками, тоді як тривала складова спектра протікає в розчиненій частині асфальтобетонної суміші. "Швидка"

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

40

релаксація найбільш яскраво виражена на початковій стадії укатки, а "повільна" — більшою мірою на основній і завершальній стадіях, що свідчить про постійний перерозподіл частин спектрів у процесі ущільнення.

Використовуючи метод передавальних функцій і розглядаючи деформацію як вхідну величину, можна визначити передавальні функції для кожного з блоків реологічної моделі. З огляду на те, що деформація всіх блоків підмоделі є однаковою, а сума напружень, що розвиваються в них, дорівнює контактному тиску, що чиниться робочим органом на шар суміші, справедливими будуть такі вирази:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t) \quad (2.9)$$

$$\sigma_k(t) = \sigma_1(t) = \sigma_2(t) = \sigma_3(t) = \sigma_1(t) + n \cdot \sigma_k(t) + m \cdot \sigma_k(t) \quad (2.10)$$

де  $n$ ,  $m$  — коефіцієнти, що характеризують розподіл напружень між блоками II і III відповідно.

Тоді загальна передавальна функція реологічної підмоделі матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & (\eta_2\theta_3 + \eta_3\theta_2) \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + (\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon}{dt} = \\ & = (\sigma_k - \sigma_T) + \theta_2\theta_3 \frac{d^2\sigma_{2-3}}{dt^2} + \theta_2 \frac{d\sigma_2}{dt} + \theta_3 \frac{d\sigma_3}{dt} \end{aligned} \quad (2.11)$$

де  $\sigma_T$  — предел плинності асфальтобетонної суміші, Па;  $\eta_2, \eta_3$  — в'язкість суміші в блоці II і III відповідно, П;  $\theta_2\theta_3$  — час «швидкої» і «повільної» релаксації в блоці II і III відповідно, с.

Системне розв'язання рівнянь (2.7) та (2.11) дає змогу вивести основну систему диференціальних рівнянь, яка описує процес взаємодії робочого вальця вібраційної ущільнювальної машини з ущільнюваним шаром дорожнього покриття під час укочування

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_k(t) &= \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot \sin \omega t - \frac{(0.02 \cdot m_1 + m_2)}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \cdot \varepsilon}{dt^2} \\ (\eta_2 \theta_3 + \eta_3 \theta_2) \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + (\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon}{dt} &= (\sigma_k - \sigma_T) + \theta_2 \theta_3 \frac{d^2 \sigma_{2-3}}{dt^2} + \theta_2 \frac{d\sigma_2}{dt} + \theta_3 \frac{d\sigma_3}{dt} \end{aligned} \right. \quad (2.12)$$

У запропонованій моделі особливу увагу приділено детальному аналізу реологічних процесів, що відбуваються в матеріалі, включаючи розділення спектру релаксації на швидкоплинну та тривалу складові. Також враховано залежність між товщиною шару і рівнем виникаючих у ньому напружень.

### 2.3 Визначення впливу вимушуючої сили вібратора на ґрунт

При виборі частоти коливань віброзбуджувача для ущільнення асфальтобетону, переходячи від початкової до необхідної щільності, рекомендується встановлювати відповідні режими вібрації.

Силу віброзбуджувача для вібраційного котка визначають за формулою (2.13).

$$P = 39,4 \cdot m_D \cdot r_D \cdot f^2 \quad (2.13)$$

де  $m_D$  – маса дебаланса, кг;

$r_D$  – радіус обертання центра ваги дебаланса, м;

$f$  – частота коливань віброзбудника, Гц [32].

Для визначення робочої швидкості вібраційного катка при роботі однією машиною і виконанням 13 проходів для укатки поверхні асфальтобетону використаємо формулу (2.14)

$$v = \frac{60 \cdot d \cdot n_{mp} \cdot f}{n_u} \quad (2.14)$$

де  $d$  – довжина дуги площі контакту вальця з поверхнею, м;

$n_{ц}$  – катрібне число циклів навантаження при ущільненні асфальтобетону  $n_{ц} = 15000$ ,

$n_{пр}$  – число проходів котка;

$f$  – частота коливань віброзбудника, Гц;

$$d = R^2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{K_{пр}(P + 9,81 \cdot m_2)}{B \cdot R \cdot E}}\right) \quad (2.15)$$

$m_2$  – маса вальця з вантажем від ваги котка, кг;

$B$  – ширина вальця котка, м;

$R$  – радіус вальця, м;

$E$  – модуль деформації асфальтобетону, Па;

$K_{пр}$  – коефіцієнт перевищення навантаження розраховується за рекомендаціями [32].

$$K_{пр} = -0,018 \cdot \left(\frac{P}{m_2 \cdot a'}\right) + 5,18 \quad (2.16)$$

$a'$  – середнє арифметичне значення віброприскорення,  $a' = 1 \text{ м/с}^2$  ( $a = 1 \text{ м}$ )

Модуль деформації асфальтобетону визначається за залежністю [32]

$$E = \left(743\left(\frac{\rho}{\rho_{\max}}\right)^2 - 1279\left(\frac{\rho}{\rho_{\max}}\right) + 560\right)E' \quad (2.17)$$

$E'$  – середнє арифметичне значення модуль деформації,  $E' = 1 \text{ МПа}$ .

$$\sigma = K_{пр} \frac{P + 9,81 \cdot m_2}{B \cdot d} \quad (2.18)$$

Визначення товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації, м.

					ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ	Ли
						4
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

$$h = h' \cdot \frac{\rho_k}{\rho} \cdot \log K_3 \left( \frac{50,2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma'} K_y \cdot a' + 13,3 K_y \cdot a' - 35,2 \frac{\sigma}{\sigma'} \cdot a' - 9,3 \cdot a'}{\left( -0,018 \left( \frac{P}{m_2} \right)^2 + 5 \cdot \frac{P}{m_2} + 50,8 \cdot a' \right) \cdot (0,86 - 1,3 \cdot K_y + 1,44 \cdot \frac{\sigma}{\sigma'})} \right) \quad (2.19)$$

$\rho_k$  – кінцева щільність асфальтобетону кг/м<sup>3</sup>;

$K_3$  – коефіцієнт, що враховує зниження значень віброприскорень по товщині асфальтобетону;

$\sigma$  – напруження на плямі контакту вальця з асфальтобетоном на кінцевій стадії ущільнення, МПа;

$\sigma'$  – середнє арифметичне значення напруження ( $\sigma' = 1$ , МПа) (

$h'$  – середнє арифметичне значення товщини ( $h' = 1$ , м);

$P$  – вимушуюча сила ущільнення, Н

Можливе застосування даної методики для підбору вібраційних котків із існуючих найрозповсюдженіших машин (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристики вібраційних котків для розрахунку

	Марка котка	Експлуатаційна маса, кг	Частота вібробуджувача, Гц	Вимушуюча сила, кН	Діаметр та ширина вальця, мм
1	ДУ-98	11500	40/50	75 / 56 / 37	1200x1700
2	Caterpillar CB434D XW	7700	53	78 / 58,5 / 39	1100x1700
3	Hitachi ZC35T	3060	55	20,6/15,5/10	682x1200
4	Bomag BW 154 AP-4	7100	40/55	70/52,5/35	1100x1500
5	Volvo DD132HF	13752	66,7/45	185,6/139/92	1400x2135
6	Shantui SR04D-5	4066	50	35/26,25/17,5	900x1380

Для визначення товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації, спочатку довжина дуги площі контакту вальця з поверхнею визначається як :

$$d = R^2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{K_{\text{пр}} (P + 9,81 \cdot m_2)}{B \cdot R \cdot E}}\right) = \quad (2.20)$$

$$= 0,6^2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{5,12(75000 + 9,81 \cdot 5750)}{1,7 \cdot 0,6 \cdot 9670000}}\right) = 0,095$$

При розрахунку ваги машини часто ділимо на половину, оскільки вибрані котки мають рівний розподіл ваги між переднім і заднім вальцем.

Коефіцієнт перевищення навантаження визначається як відношення фактичного навантаження, яке перевищує розрахункове навантаження, до розрахункового навантаження. Це допомагає оцінити, наскільки навантаження, що фактично створюється при роботі котка, перевищує стандартні або проектні параметри.

$$K_{\text{пр}} = -0,018 \cdot \left(\frac{P}{m_2 \cdot a'}\right) + 5,18 = \quad (2.21)$$

$$= -0,018 \cdot \left(\frac{75000}{5750 \cdot 1}\right) + 5,18 = 5,12$$

Модуль деформації асфальтобетону, МПа.

$$E = \left(743\left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}}\right)^2 - 1279\left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}}\right) + 560\right)E' = \quad (2.22)$$

$$= \left(743\left(\frac{1800}{2100}\right)^2 - 1279\left(\frac{1800}{2100}\right) + 560\right) \cdot 1 = 9,67$$

Напруження на плямі контакту вальця з асфальтобетоном, МПа.

					<b>ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
						45
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\sigma = K_{\text{np}} \frac{P + 9.81 \cdot m_2}{B \cdot d} = 5,12 \frac{75000 + 9.81 \cdot 5750}{1,7 \cdot 0,095} = 4,17 \quad (2.23)$$

Визначення товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації, м.

$$h = h' \cdot \frac{\rho_k}{\rho} \cdot \log K_3 \left( \frac{50,2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma'} K_y \cdot a' + 13,3 K_y \cdot a' - 35,2 \frac{\sigma}{\sigma'} \cdot a' - 9,3 \cdot a'}{\left( -0,018 \left( \frac{P}{m_2} \right)^2 + 5 \cdot \frac{P}{m_2} + 50,8 \cdot a' \right) \cdot (0,86 - 1,3 \cdot K_y + 1,44 \cdot \frac{\sigma}{\sigma'})} \right) =$$

$$= 1 \cdot \frac{2100}{1800} \cdot \log_{0,3} \left( \frac{50,2 \cdot \frac{4,17}{1} \cdot 1,16 \cdot 1 + 13,3 \cdot 1,16 \cdot 1 - 35,2 \cdot \frac{4,17}{1} \cdot 1 - 9,3 \cdot 1}{\left( -0,018 \left( \frac{75000}{57500} \right)^2 + 5 \cdot \frac{75000}{57500} + 50,8 \cdot 1 \right) \cdot (0,86 - 1,3 \cdot 1,16 + 1,44 \cdot \frac{4,17}{1})} \right) =$$

$$= 0,488 \quad (2.24)$$

Отже, для вібраційного котка ДУ-98 товщина шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації під вальцем, складає 0,50 м.

Для проведення розрахунків було вибрано наступні типи котків які мають подібну конфігурацію.



Рисунок 2.6 – Коток ДУ-98

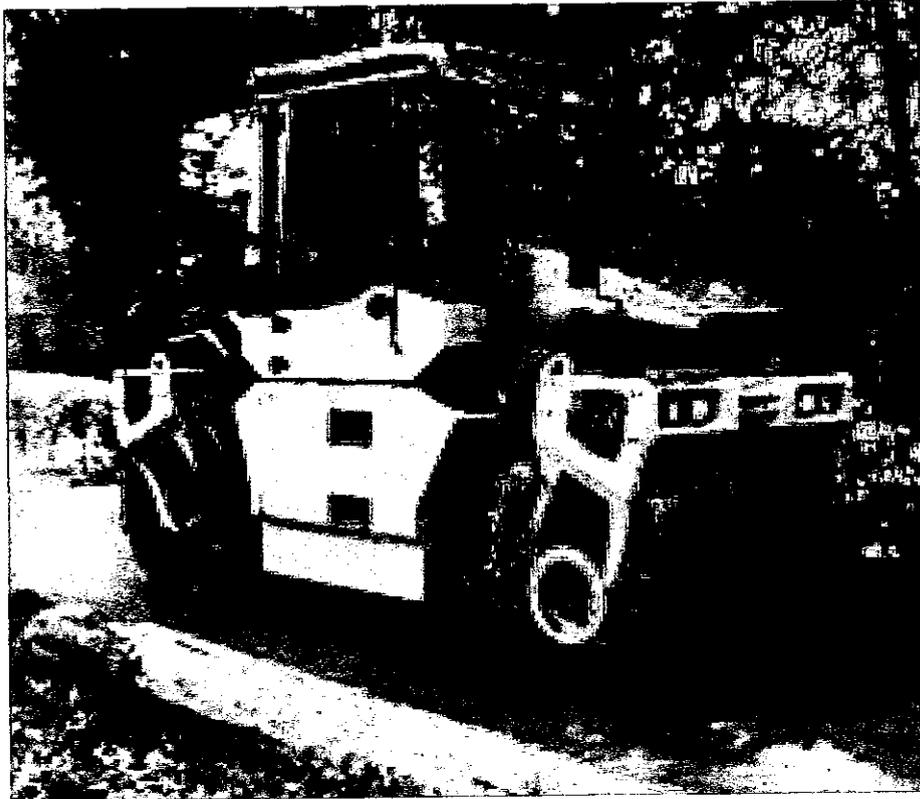


Рисунок 2.7 – Bomag BM 154 AP4

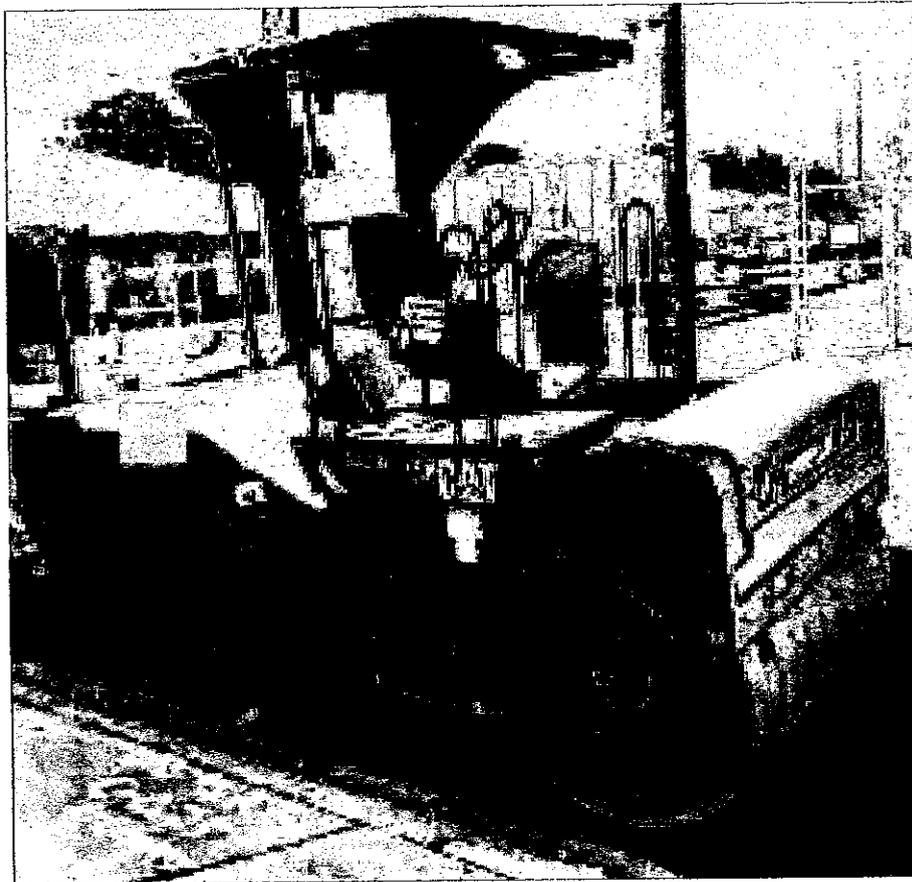


Рисунок 2.8 – Caterpillar CB434D XW

Зм.	Лист	№ докум.	Підп. Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

47



Рисунок 2.9 – Volvo DD132HF

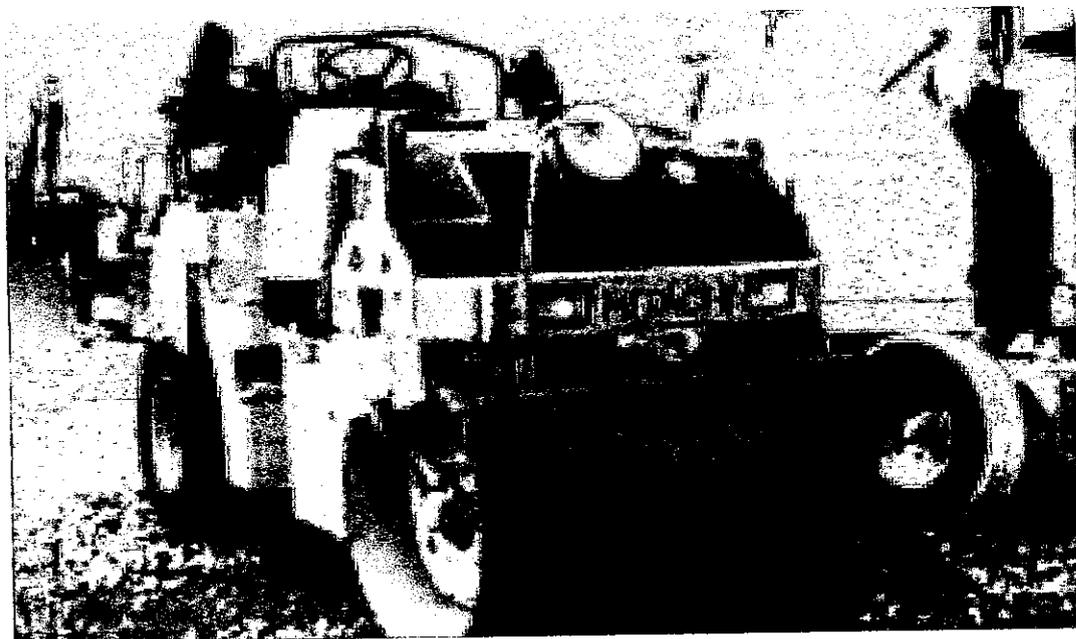


Рисунок 2.10 – Hitachi XC35T

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

48



Рисунок 2.11 – Shantui sr04d-5

Для спрощення розрахунків ці формули можна занести в Microsoft Excel і виконати обчислення (див. рисунок 2.12).

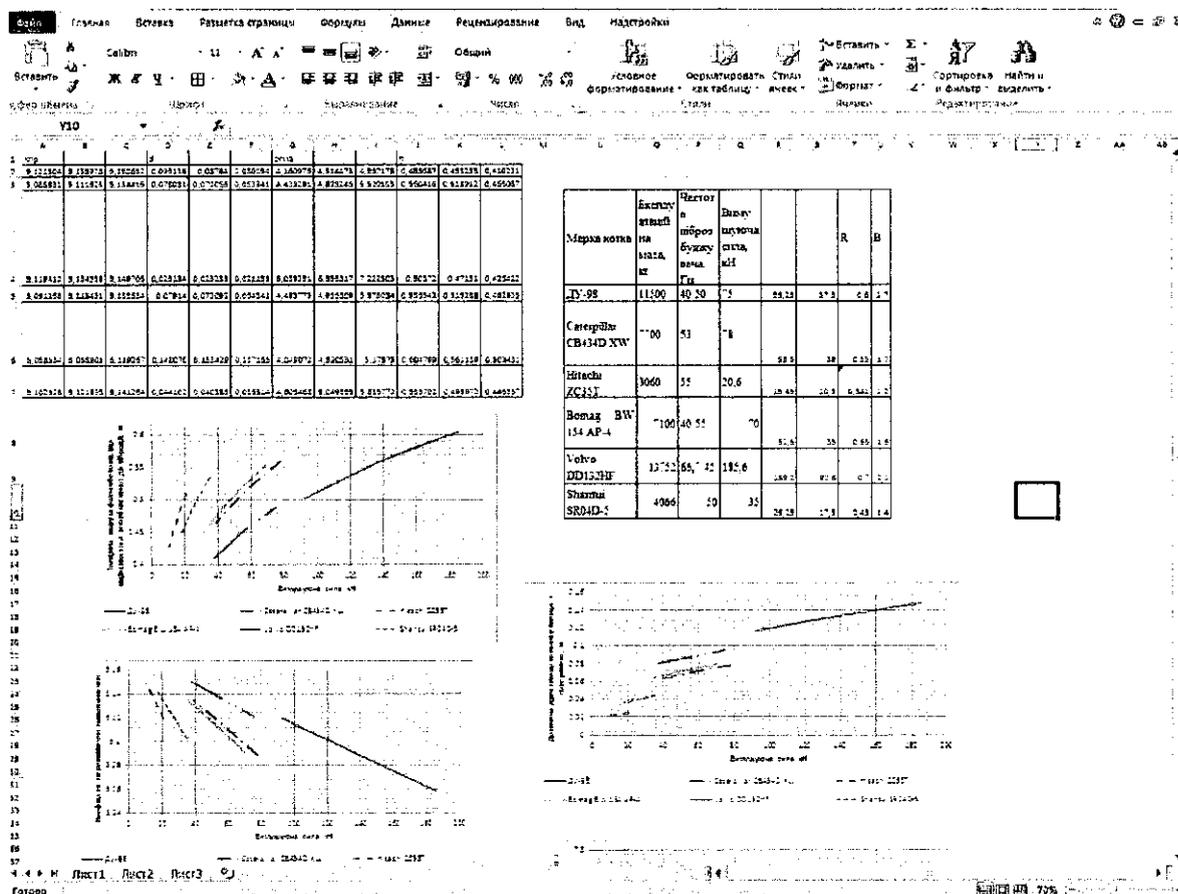


Рисунок 2.12 – Вікно Microsoft Excel з рзрахунками

На рисунках 2.13 – 2.16 представлені графічні залежності, що відображають: напруження на контактній площині між вальцем та асфальтобетоном, довжину дуги контакту вальця з асфальтобетонним покриттям, коефіцієнт перевищення навантаження, а також товщину шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної вібрації, як функцію від вимушуючої сили. Додатково, ці графіки ілюструють, як змінюється ефективність ущільнення в залежності від обраних параметрів вібраційного процесу та конструктивних особливостей вальця.

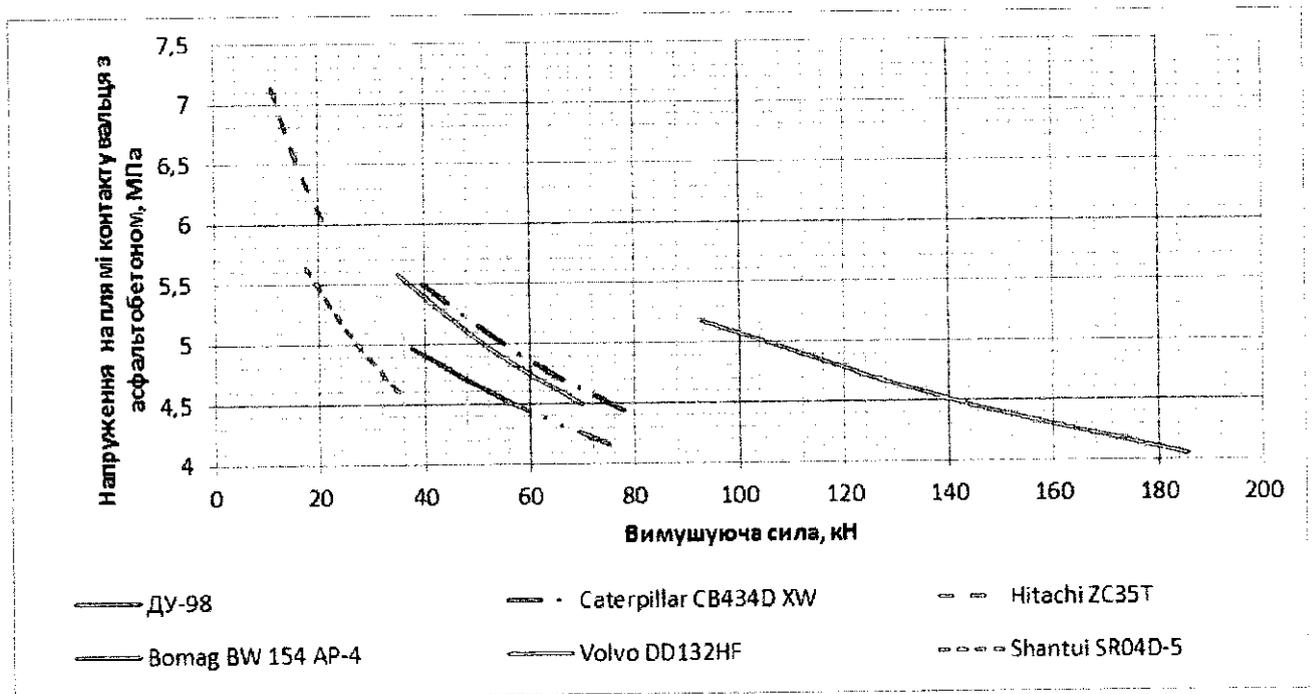


Рисунок 2.13 – Залежність напруження на плямі контакту вальця з поверхнею, що ущільнюється від вимушуючої сили

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист	3
------	---

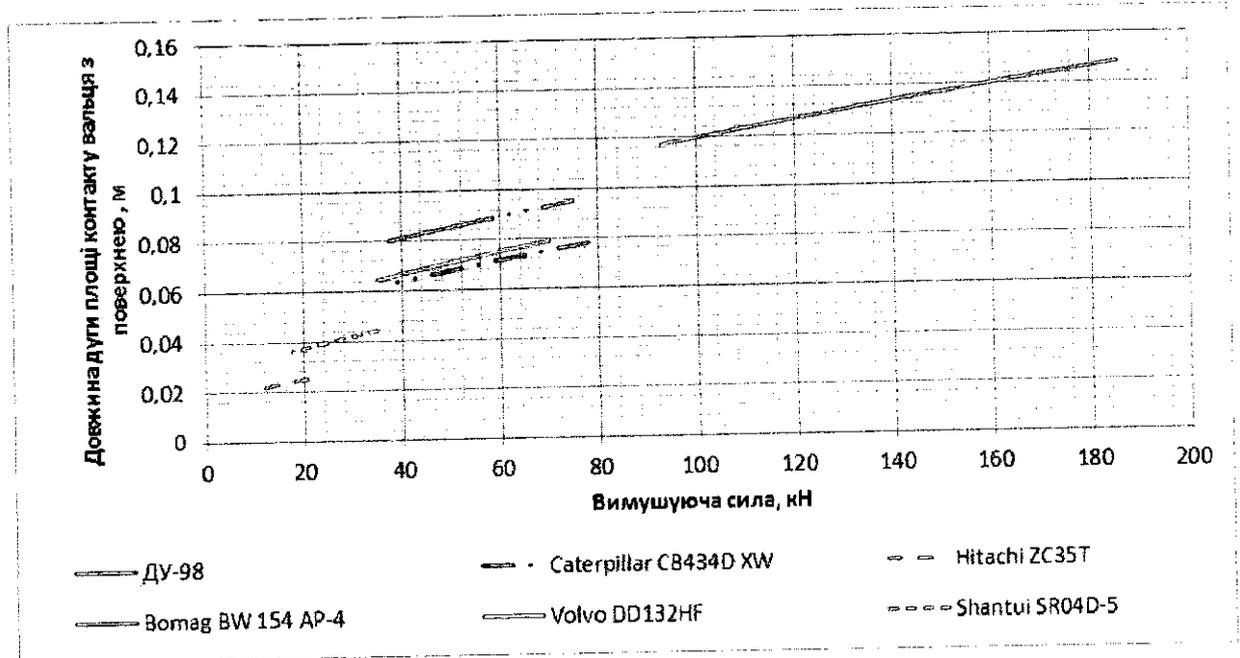


Рисунок 2.14– Залежність довжини дуги площі контакту вальця з поверхнею, що ущільнюється від вимушуючої сили

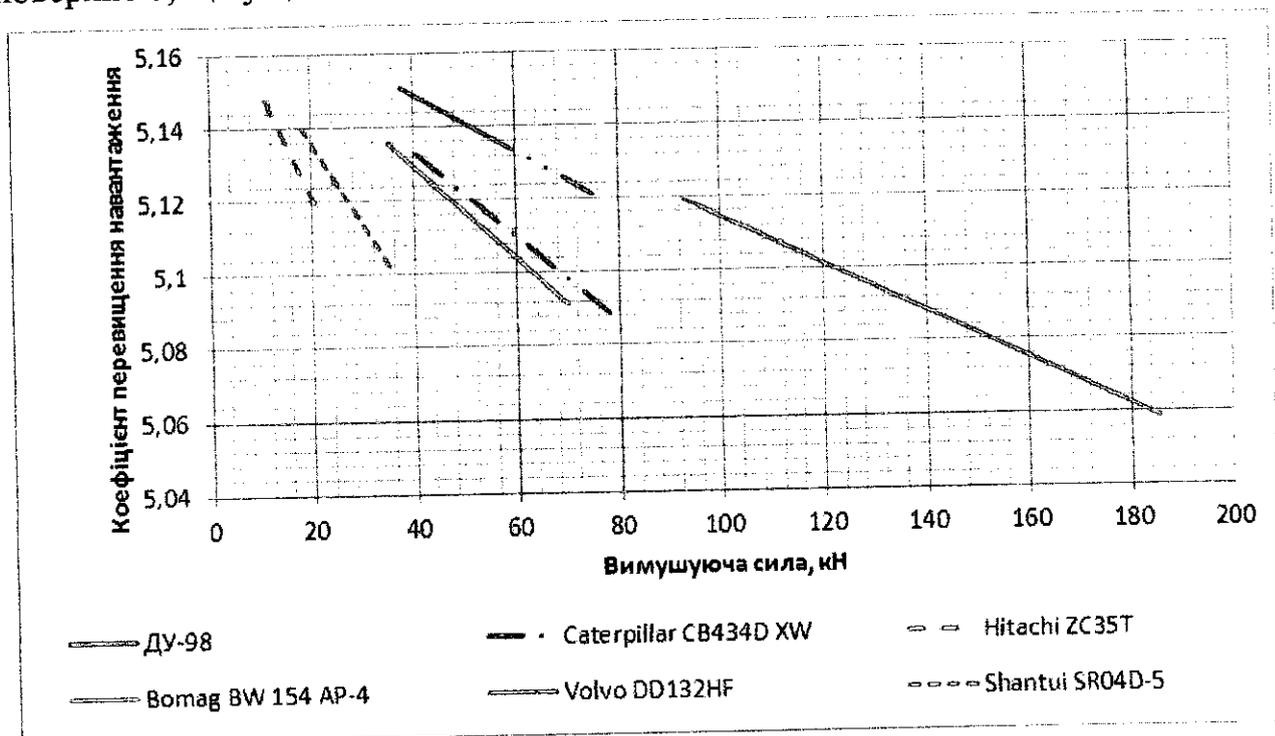


Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнту перевищення навантаження від вимушуючої сили

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

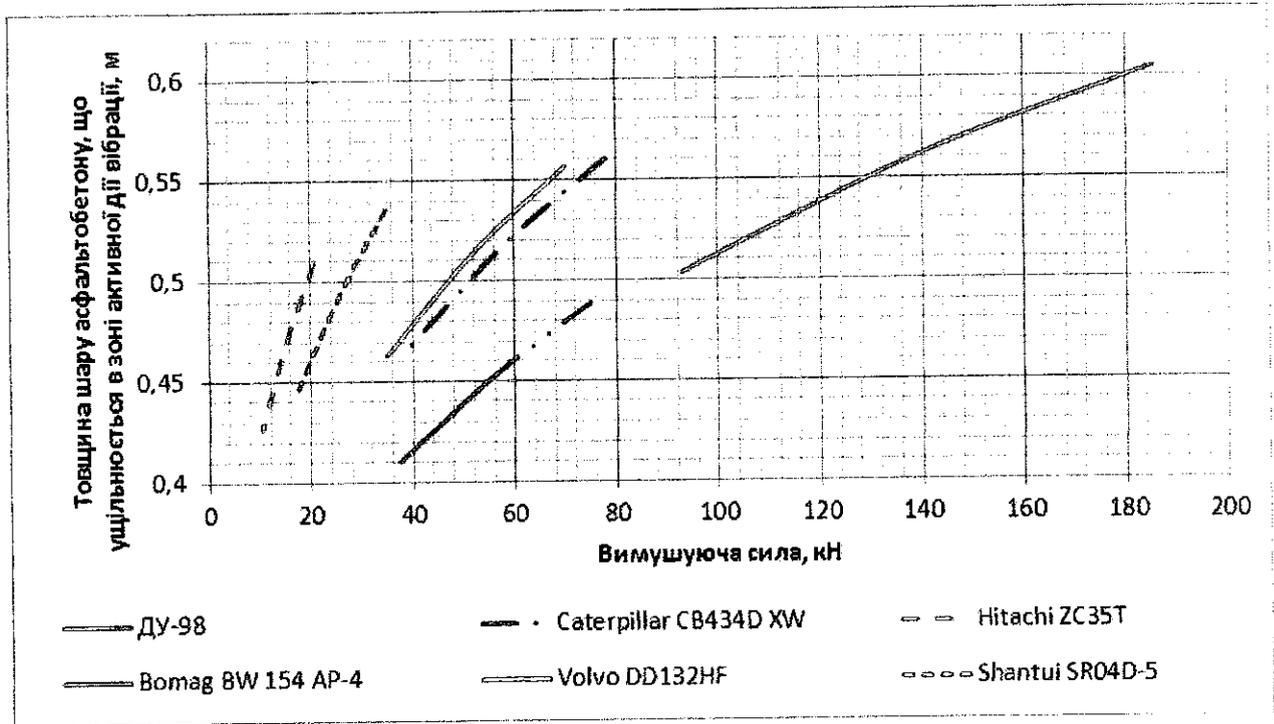


Рисунок 2.16 – Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації від вимушуючої сили

Наступним етапом розрахунку було занесення в розрахунки параметрів для розрахунку з кулачковою поверхнею котків. На рисунку 2.17-2.18 зображено конструктивне рішення універсального пристосування-бандажу який надягається на вальці зверху і дозволяє ущільнювати земляні, піщані та гравійні поверхні. Процес монтажу зображено на рисунку 2.19.

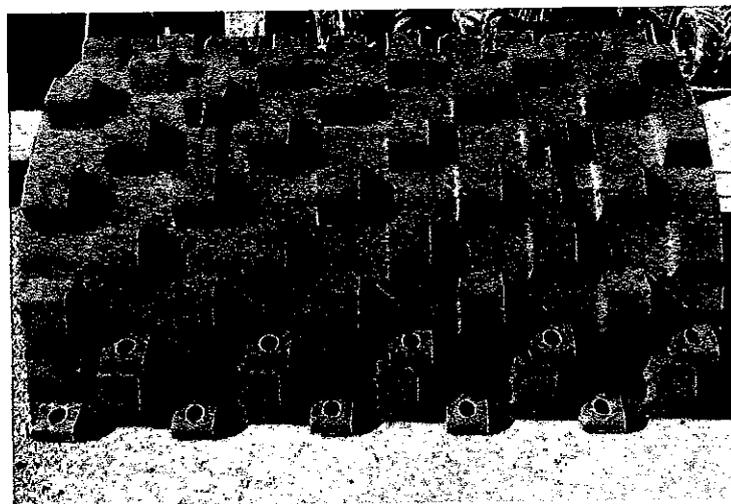


Рисунок 2.17 – Кулачковий бандаж

Зм.	Лист	№ докум.	Підп. Дата

ГМiМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

52



Рисунок 2.18 – Кулачковий бандаж

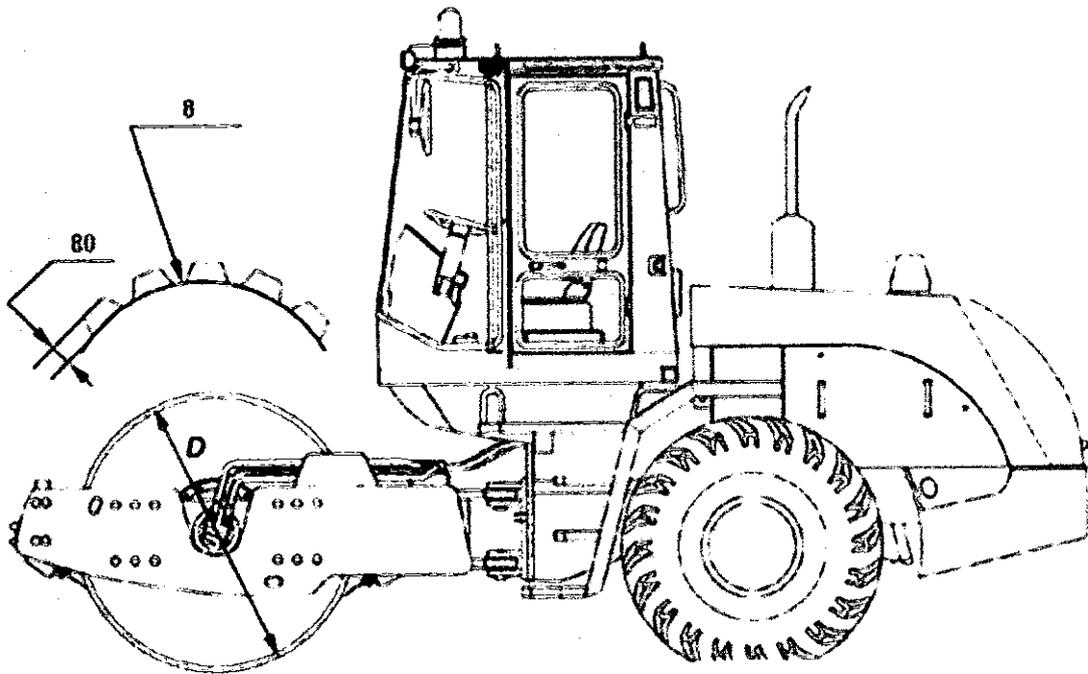


Рисунок 2.19 – Процес монтажу бандажу на коток

Графіки на яких зображено залежності глибини ущільнення поверхні від вимушеної сили та типу котка зображено на рисунках 2.20-2.26.

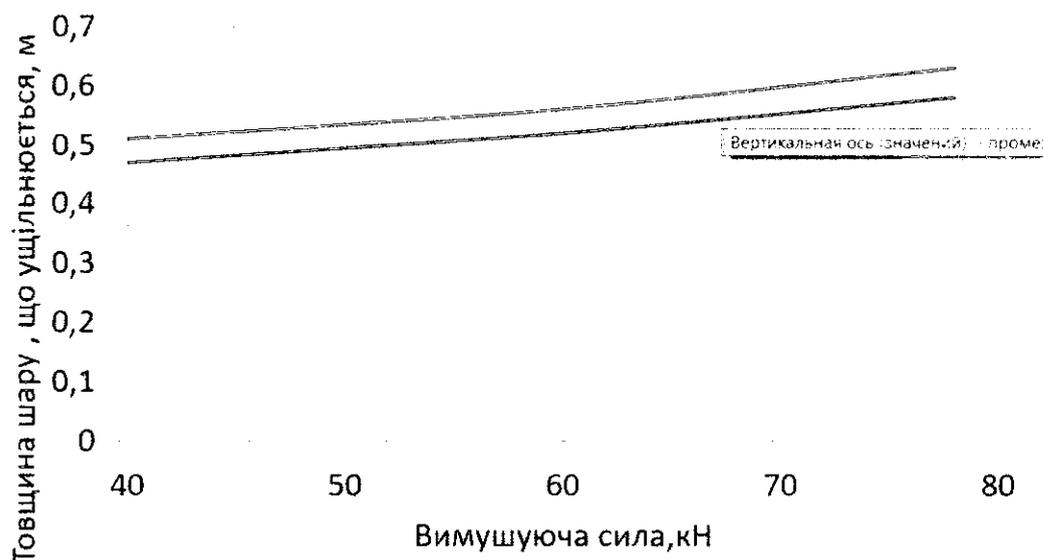
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

53

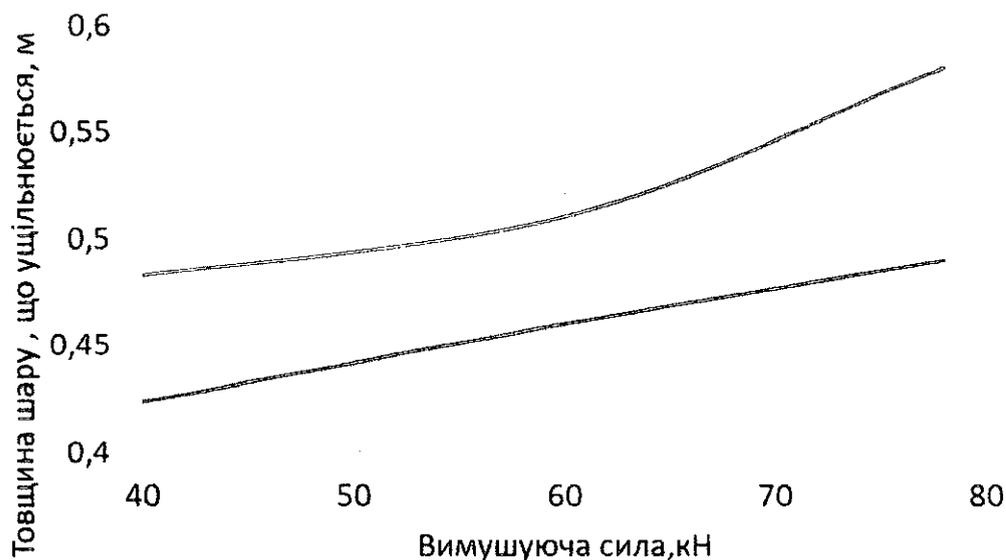
### Caterpillar CB434D XW



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.20— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Caterpillar CB434D XW з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

### ДУ-98



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.21— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка ДУ-98 з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

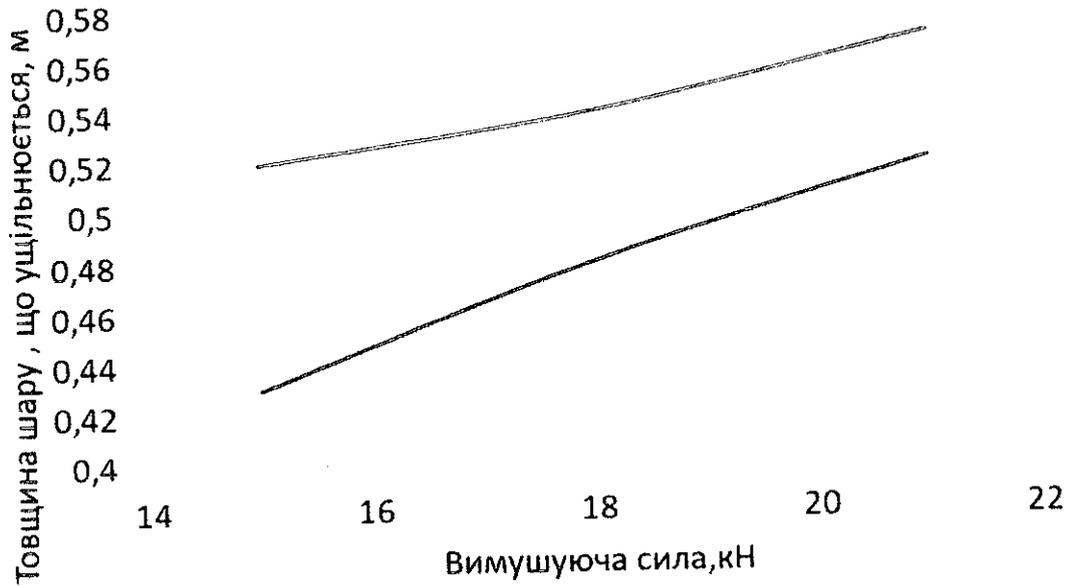
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

54

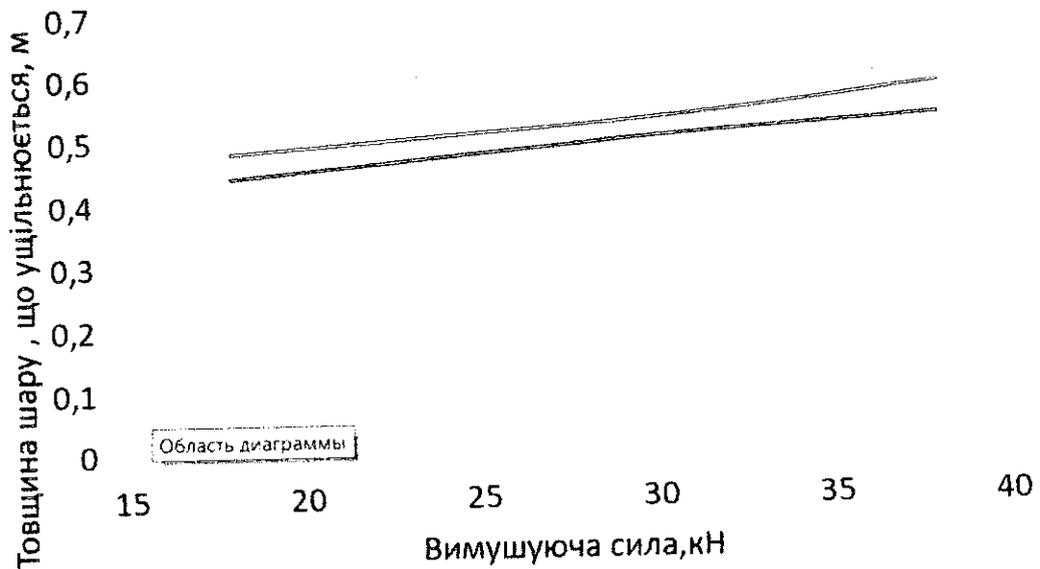
### Hitachi XC35T



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.22– Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Hitachi XC35T з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

### Shantui sr04d-5



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.23– Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Shantui sr04d-5 з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

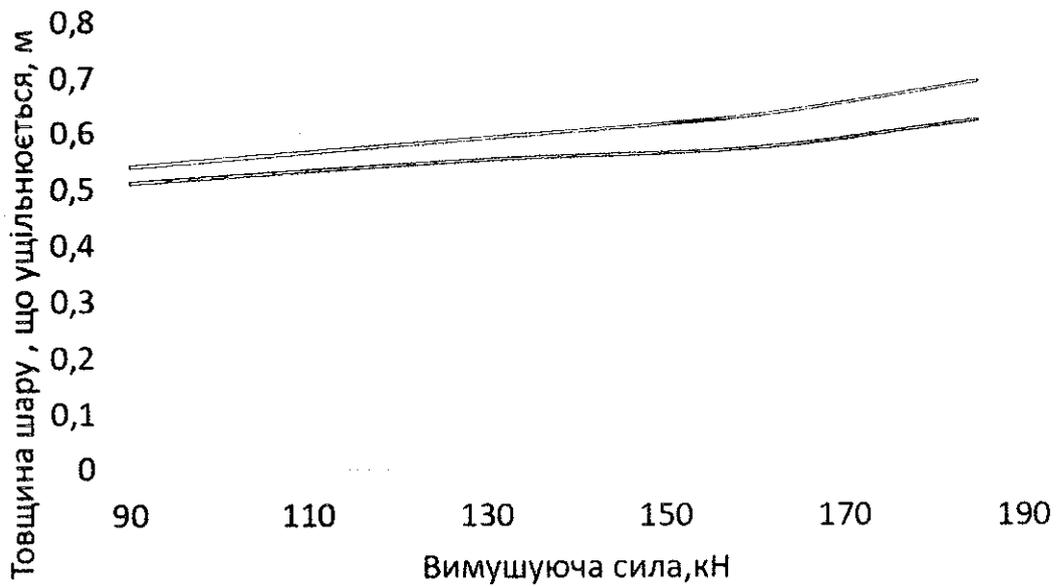
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ

Лист

55

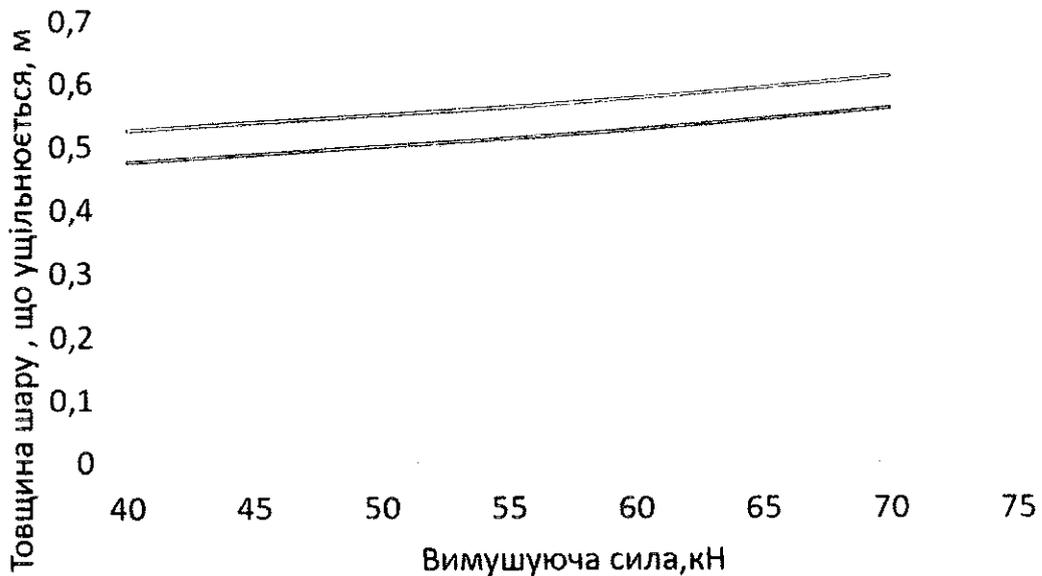
### Volvo DD132HF



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.24– Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Volvo DD132HF з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

### Bomag BM 154 AP4



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.25– Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Bomag BM 154 AP4 з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

## Висновки

У даному дослідженні вивчався процес ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою вібраційних котків з варіацією зусиль вібрації. Аналіз наявних досліджень, що зосереджені на обладнанні та технології ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей, а також на закономірностях зміни характеристик дорожніх матеріалів під час укатки, дозволяє сформулювати наступні висновки:

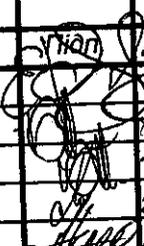
– Більшість сучасних засобів ущільнення характеризуються обмеженою універсальністю і вузьким діапазоном варіювання силових впливів на шар асфальтобетонної суміші. Це знижує їх ефективність з точки зору продуктивності та витрат на укатку, а також ускладнює досягнення якісного дорожнього покриття.

– Для підвищення ефективності технології ущільнення необхідно оптимізувати параметри вібрації. Це допоможе усунути недоліки існуючих дорожніх котків і розширити їх застосування в різних температурних умовах укатки.

– Розглянуто математичну модель, що описує процес взаємодії робочих органів котків з дорожнім покриттям. Ця модель дозволяє визначити оптимальні параметри котка для ущільнення та налаштування його режиму при укатці конкретної асфальтобетонної суміші.

– Запропоновано методику розрахунку параметрів впливу вібраційного котка, базуючися на зміні зусиль вібрації в залежності від товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації.

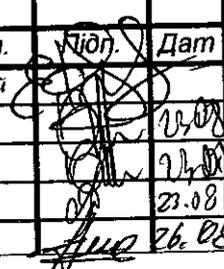
– Для досягнення найбільшої ефективності ущільнення певної асфальтобетонної суміші важливо встановити залежності її міцності від щільності та температури в межах, відповідних укатці дорожніх покриттів.

<b>ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>							
Зм.	Лист	№ докум.	Уклад	Дат	<b>Висновки</b>		
Розроб.		Кричинський		23.08			
Перев.		Коробко		23.08			
Керівн.		Коробко		23.08			
Н. контр.		Васильєв		23.08			
Затв.		Орисенко		26.08	Лім.	Лист	Листів
					Н		
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

## Список літератури

1. Головнін, А.А. Віброволновий валець дорожнього катка KB-03 / А.А. Головнін // Наука і техніка в дорожній галузі. – 2011. – № 3. – С. 38-40.
2. Вібраційні катки компанії Sakai America // Будівельні і дорожні машини. – 2010. – № 11. – С. 12-14.
3. Бушанський, С.П. Проблеми зниження вартості будівництва автомобільних доріг / С.П. Бушанський // Національні інтереси: пріоритети та безпека. – М., 2013. – № 18. – С. 9-15.
4. Богомолів, В.А. Прості зв'язки лінійної просторової реологічної моделі асфальтобетону / В.А. Богомолів, В.К. Жданюк, С.В. Богомолів // Автомобільний транспорт. – 2010. – Вип. 27. – С. 157-162.
5. Золотарев, В.А. Реологічна модель асфальтобетону / В.А. Золотарев, В.В. Маляр, Ю.П. Ткачук // Сучасне промислове і цивільне будівництво. – 2006. – Т.3. – № 2. – С. 103-107.
6. Золотарев, В.А. Реологічні властивості асфальтополімербетонів при динамічних режимах деформування / В.А. Золотарев, В.В. Маляр, А.С. Лапченко // Наука і техніка в дорожній галузі. – 2008. – № 1. – С. 10-13.
7. Емельянов, Р.Т. Дослідження процесу ущільнення асфальтобетонної суміші по ширині укладки / Р.Т. Емельянов, А.П. Прокоп'єв, А.С. Клімов // Будівельні і дорожні машини. – 2009. – № 7. – С. 12-17.
8. "Каталог дорожніх машин Volvo". – Львів: ТОВ «Волтех Україна», 2016. – 44 с.
9. Лютенко В.Є. Дослідження експлуатаційних властивостей дорожніх катків при різних режимах ущільнення асфальтобетонних сумішей // Збірник наукових праць Національного університету "Полтавська політехніка імені Юрія

**ГМІМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ**

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат					
		Кричинський			<b>Список літератури</b>	Літ.	Лист	Листів	
Розроб.		Коробко				Н			
Перев.		Коробко					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Керівн.		Васильєв							
Н. контр.		Орисенко							
Затв.									

Кондратюка". – Полтава: НУПП, 2015. – С. 23-28.

10. Лютенко В.Є. Технічні засоби і методи підвищення ефективності ущільнення дорожніх покриттів катками на пневматичних шинах // Збірник наукових праць "Технології та механізація дорожньо-будівельних робіт". – Полтава: НУПП, 2022. – С. 34-39.
11. "Розвиток технологій дорожнього будівництва: сучасні тенденції" / Під ред. В.П. Мельника. – Київ: НТУ, 2015. – 256 с.
12. "Сучасні тенденції у виробництві дорожніх катків" / А.В. Трофимов, О.В. Іванченко // Дорожні машини і механізми. – 2016. – № 4. – С. 12-18.
13. "Технічні каталоги Shantui". – Київ: ДП «Українські машини», 2019. – 55 с.
14. Іванов, С.В. Дорожня техніка: конструкція та принципи експлуатації / С.В. Іванов, П.О. Ковальчук. – Київ: Політехніка, 2012. – 318 с.
15. "Посібник з будівництва та експлуатації асфальтобетонних доріг" / За ред. І.В. Коваленка. – Львів: Львівська політехніка, 2010. – 370 с.
16. Трофименко, М.С. Дорожні катки та їх застосування в Україні / М.С. Трофименко, О.В. Григорович // Транспортні системи України. – 2018. – № 5. – С. 27-33.
17. "Дорожньо-будівельні машини" / За ред. О.М. Паламарчука. – Київ: Видавництво НТУ, 2015. – 472 с.
18. "Compaction Equipment Handbook" by John A. Dobson. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 325 p.
19. "Caterpillar Paving Products Manual". – Peoria, IL: Caterpillar Inc., 2015. – 85p.
20. "Bomag Compaction Techniques". – Boppard: Bomag GmbH, 2018. – 65 p.
21. "Principles of Asphalt Compaction" by Franz Joseph Wirth. – Berlin: Springer, 2014. – 276 p.
22. "Volvo Paving and Compaction Handbook". – Gothenburg: Volvo CE, 2019. – 70 p
23. "Heavy Construction Equipment: Techniques and Practices" by David A. Day and Neal B. H. Benjamin. – Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2010. – 450p.

					<b>ГМiМ.601ММв.010-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		59

## Додатки

Презентаційні матеріали за темою:

«Дослідження геометричних параметрів котків для  
ущільнення ґрунту з різною формою поверхні»

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Кваліфікаційна робота магістра

на тему:

Дослідження геометричних параметрів котків для ущільнення  
грунту з різною формою поверхні

Виконав: студент VI курсу, групи 601-ММв  
напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кричинський Євген Анатолійович

(прізвище та ініціали)

Керівник проф. Коробко Б.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Сердюк В.О.

(прізвище та ініціали)

Полтава 2024

## Аналіз технології ущільнення дорожніми котками



Рисунок 1.1 – Каток статичної дії

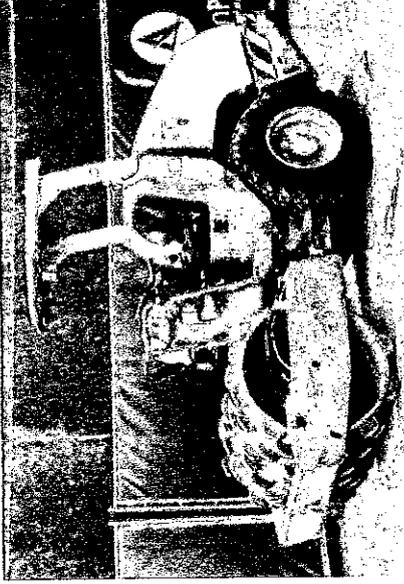


Рисунок 1.3 – Каток статичної дії

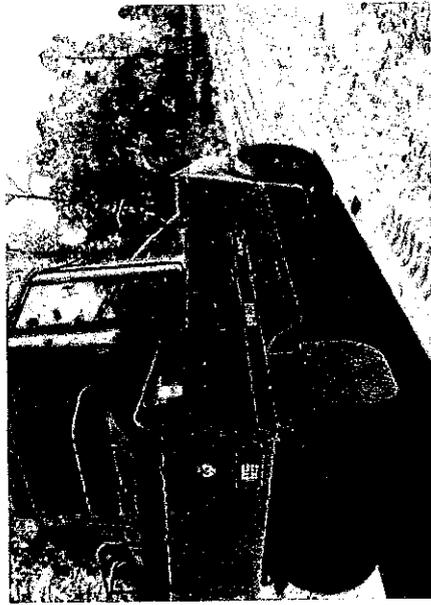


Рисунок 1.2 – Пневмоколісний каток

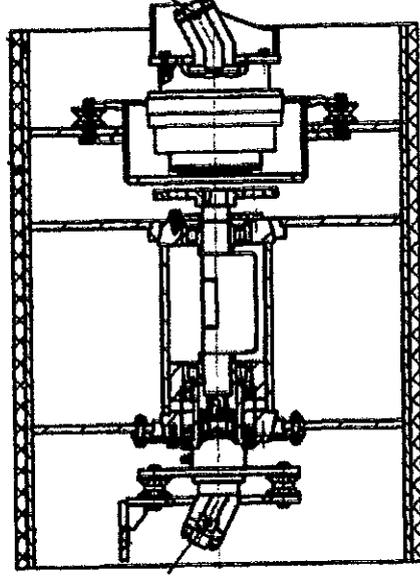
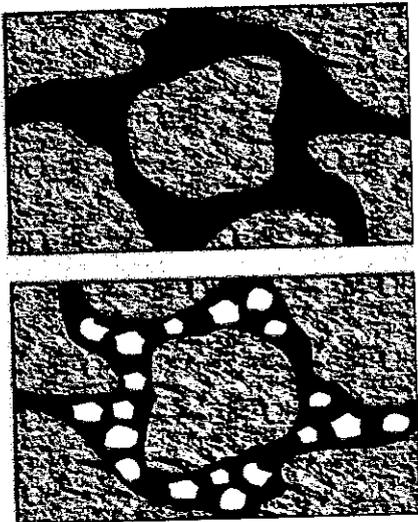


Рисунок 1.4 – Вібраційний вальць



а) з мінеральним поршком, б) без поршкка

Рисунок 1.5 — Асфальтобетон

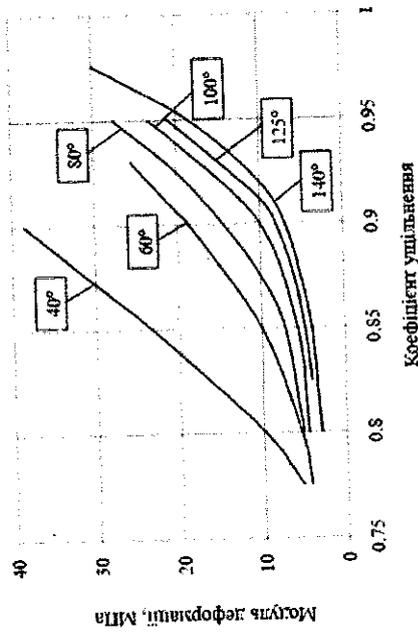


Рисунок 1.7 - Залежність модуля деформації асфальтобетонної суміші від коефіцієнта ущільнення.

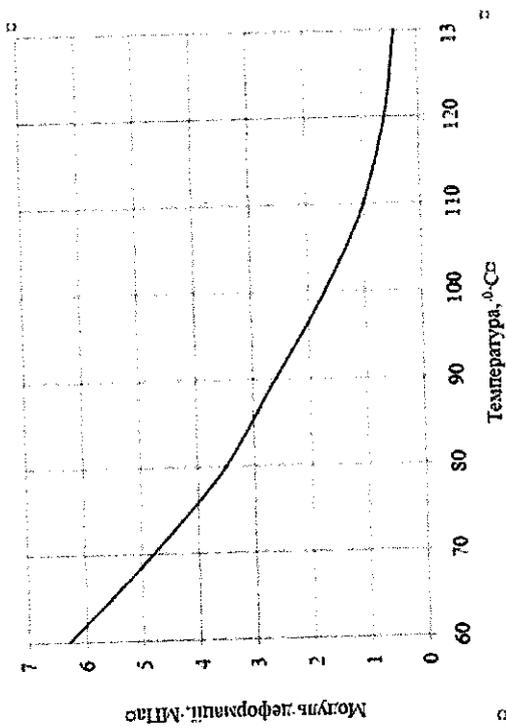
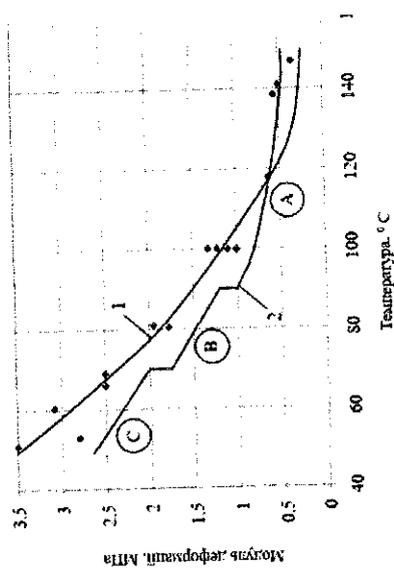


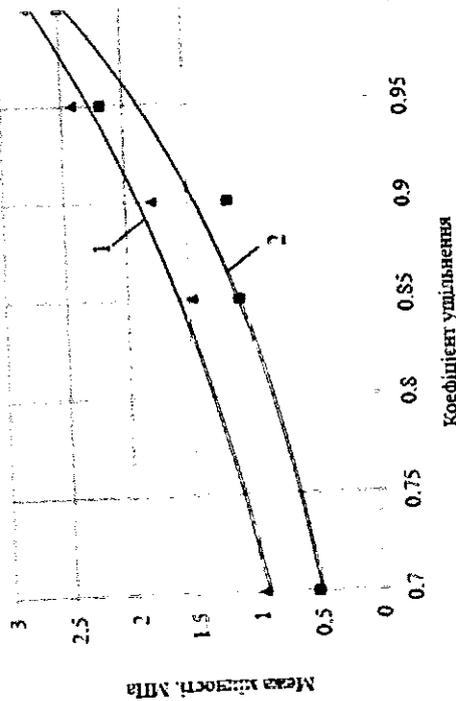
Рисунок 1.6 - Графік залежності модуля деформації асфальтобет суміші від температури



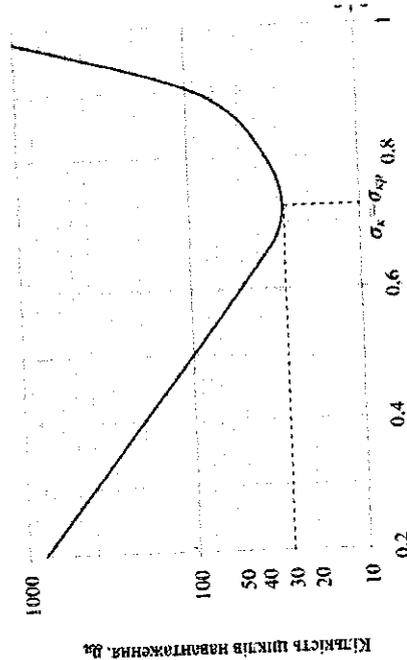
1 - між шпінності матеріалу; 2 - максимальні напруження під впливом котви.

А - ДУ-47; В - ДУ-48; С - ДУ-49А.

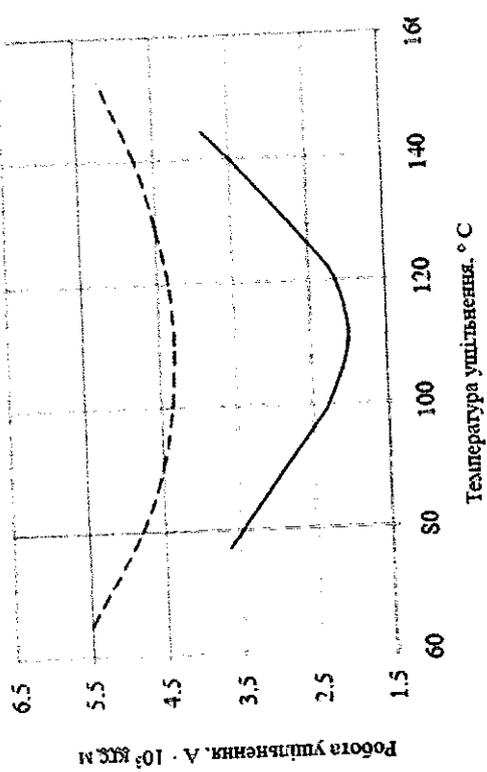
Рисунок 1.8 - Залежність межі шпінності асфальтобетонної суміші та максимальних контактних тисків від температури.



1 - суміш типу А; 2 - суміш типу Б.  
Рисунок 1.9 - Вплив коефіцієнта ущільнення на межі міцності



Відношення контактних тисків до межі міцності  
Рисунок 2.1 - Залежність необхідної кількості циклів навантаження від співвідношення контактних тисків і межі міцності асфальтобетонної суміші.



1 - вміст щебеню 30%; 2 - - - вміст щебеню 50%  
Рисунок 1.10 - Залежність якості ущільнення покриття від температури

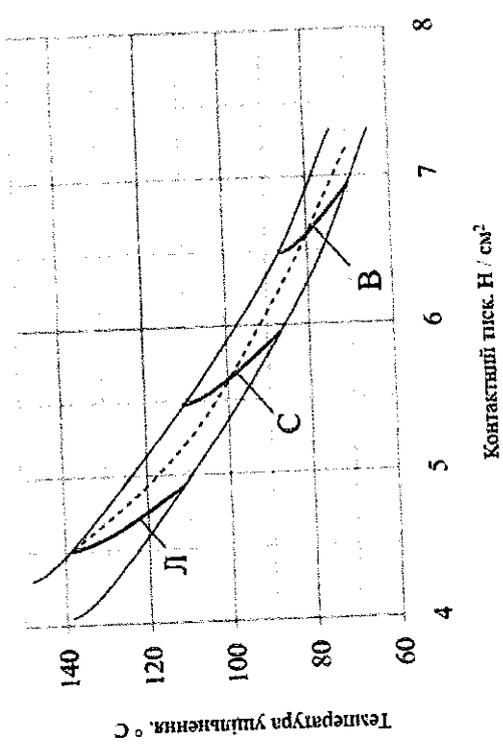


Рисунок 2.2 - Схема узгодки суміші котками

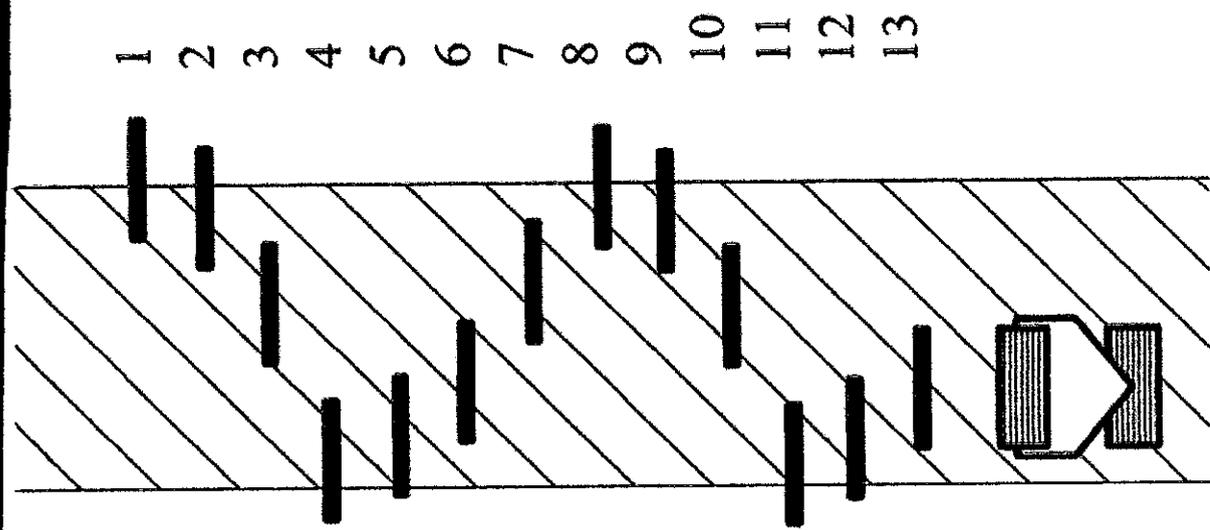


Рисунок 2.3 – Схема руху катка

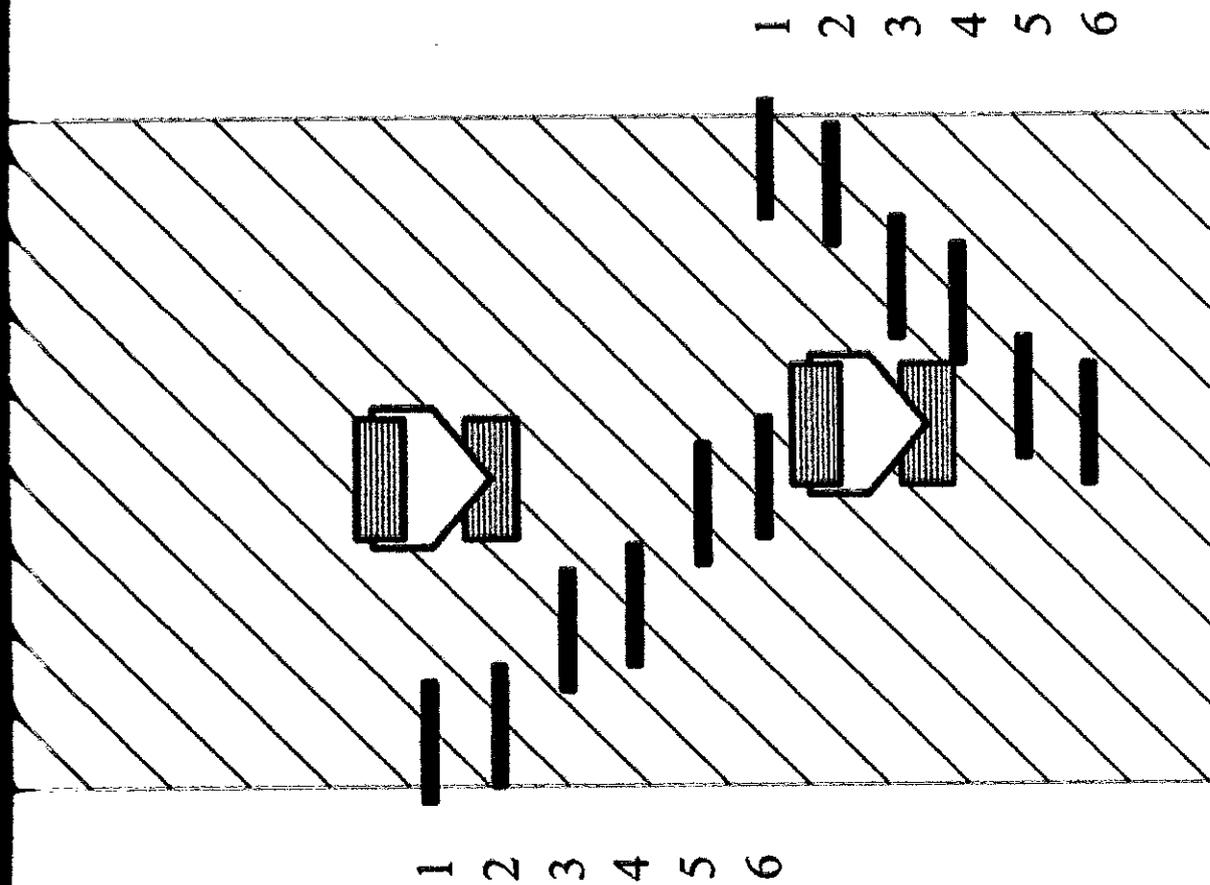


Рисунок 2.4 – Схема накатки катків при повторному проходженні

Таблиця 2.1 – Характеристики вібраційних котків для розрахунку

Марка котка	Експлуатаційна маса, кг	Частота вібраційного руху, Гц	Виміщувача сила, кН	Діаметр г. ширина вальця, мм
1 ДУ-98	11500	40/50	75 / 56 / 37	1200x1700
2 Caterpillar CB434D XW	7700	53	78 / 58,5 / 39	1100x1700
3 Hitachi ZC35T	3060	55	20,6/15,5/10	682x1200
4 Bomag BW 154 AP-4	7100	40/55	70/52,5/35	1100x1500
5 Volvo DD132HF	13752	66,7/45	185,6/139/92	1400x2130
6 Shantui SR04D-5	4066	50	35/26,25/17,5	900x1380

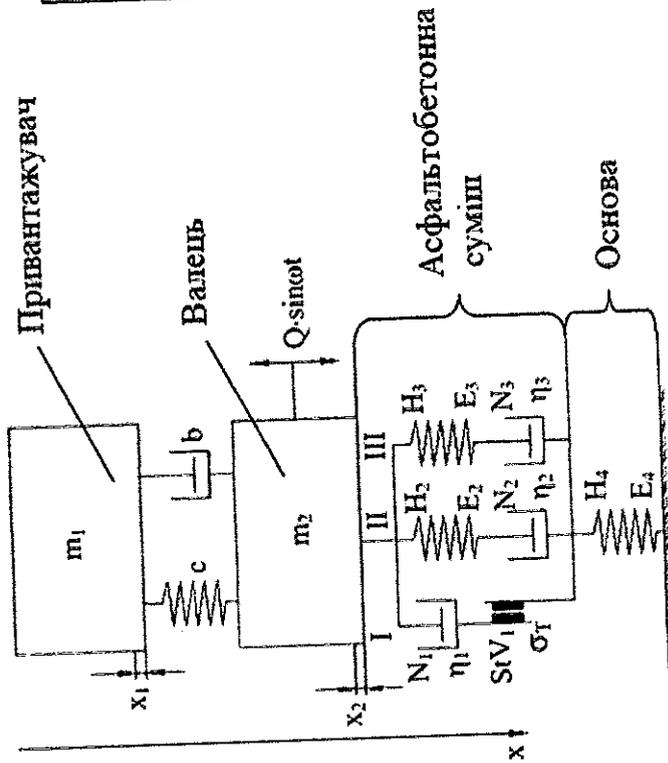


Рисунок 2.5 – Модель вальців катка

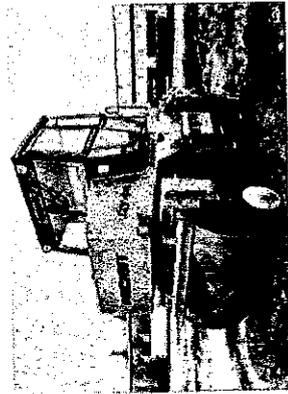


Рисунок 2.6 – Коток ДУ-98

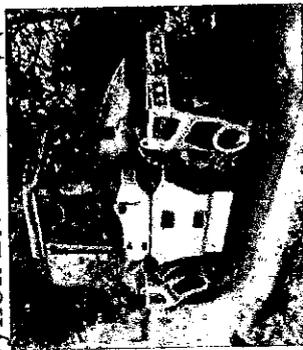


Рисунок 2.7 – Bobcat VM 154 AR4

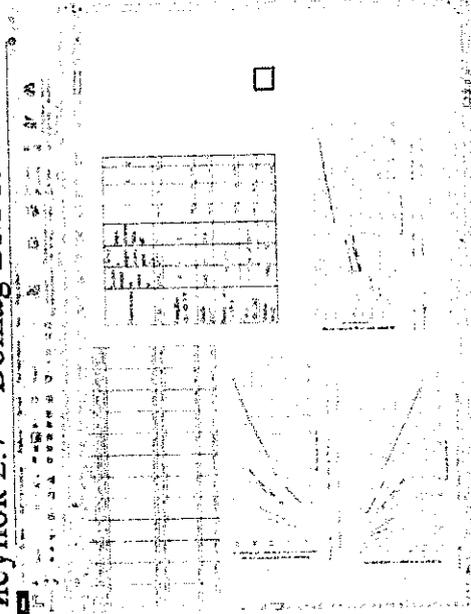


Рисунок 2.12 – Вікно Microsoft Excel з рзрахунками

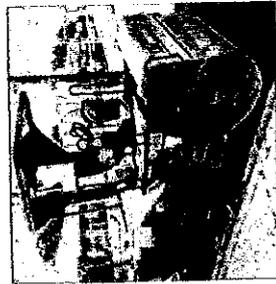


Рисунок 2.8 – Сатерпілар СВ434Д  
ХВ



Рисунок 2.9 – Volvo DD132HF

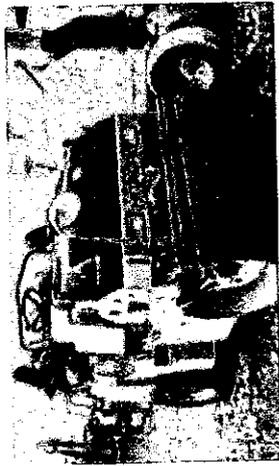


Рисунок 2.10 – Hitachi XC35T

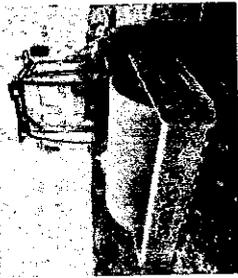
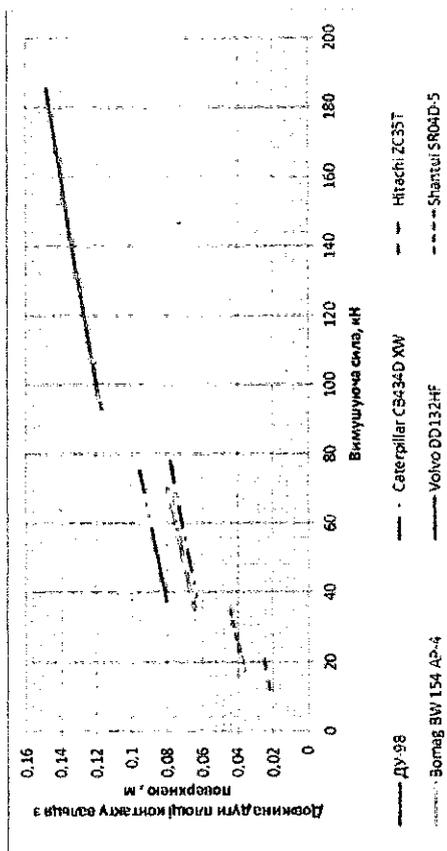
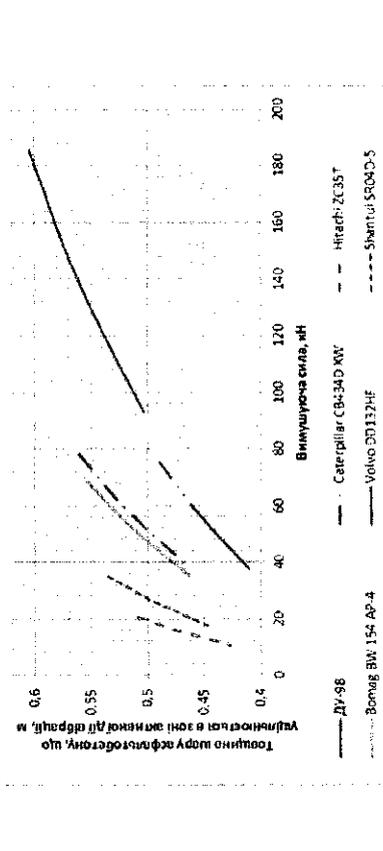


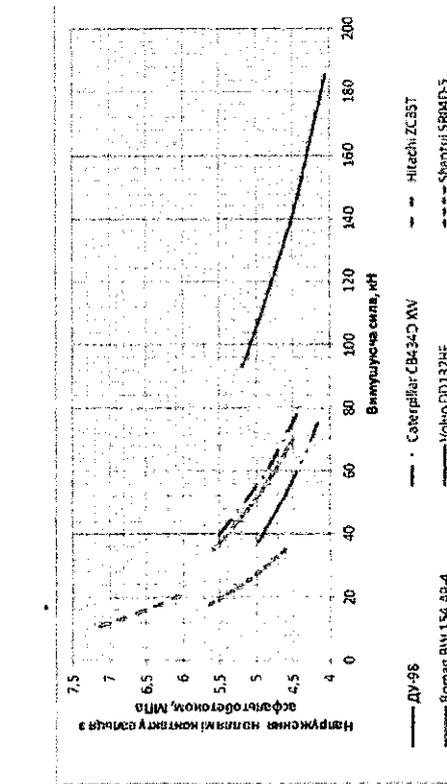
Рисунок 2.11 – Shantui sg04d-5



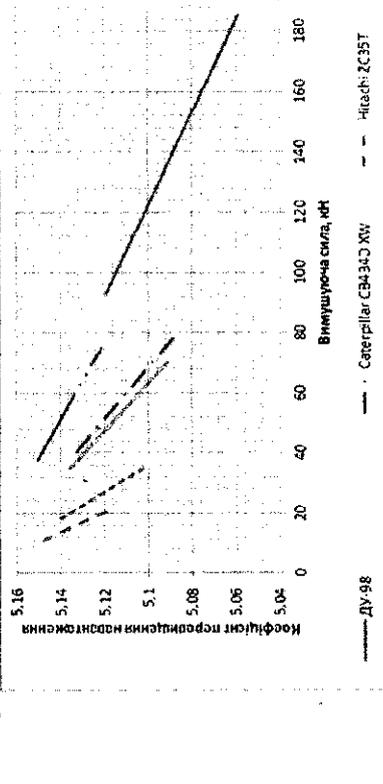
**Рисунок 2.14 – Залежність довжини дуги площі контакту вальця з поверхнею, що ущільнюється від вимушучої сили**



**Рисунок 2.16 – Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації від вимушучої сили**



**Рисунок 2.13 – Залежність напруження на плямі контакту вальця з поверхнею, що ущільнюється від вимушучої сили**



**Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнту перевищення навантаження від вимушучої сили**



Рисунок 2.18 – Кулачковый бандаж

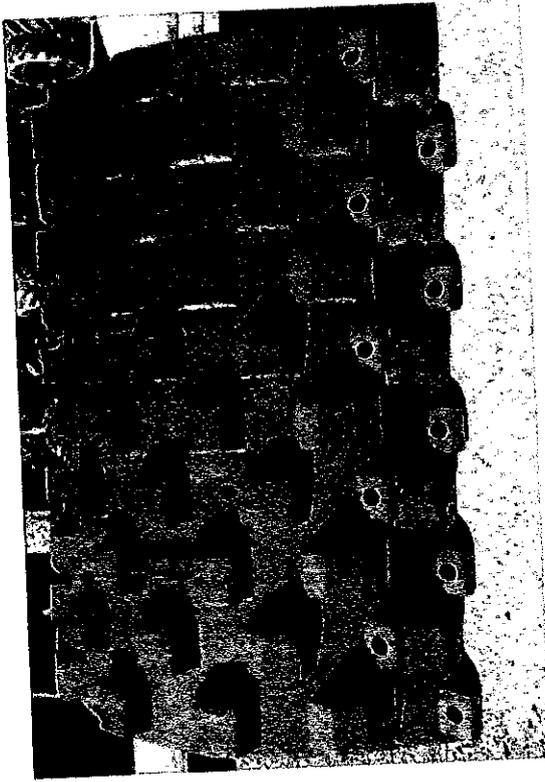


Рисунок 2.17 – Кулачковый бандаж

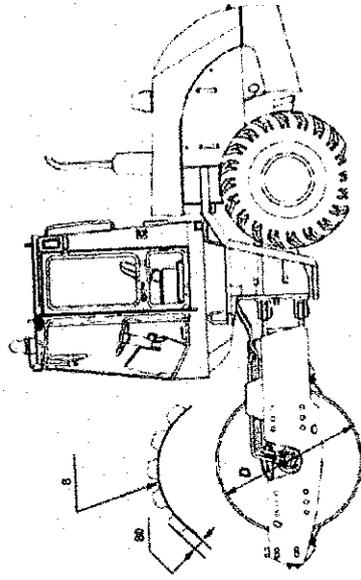
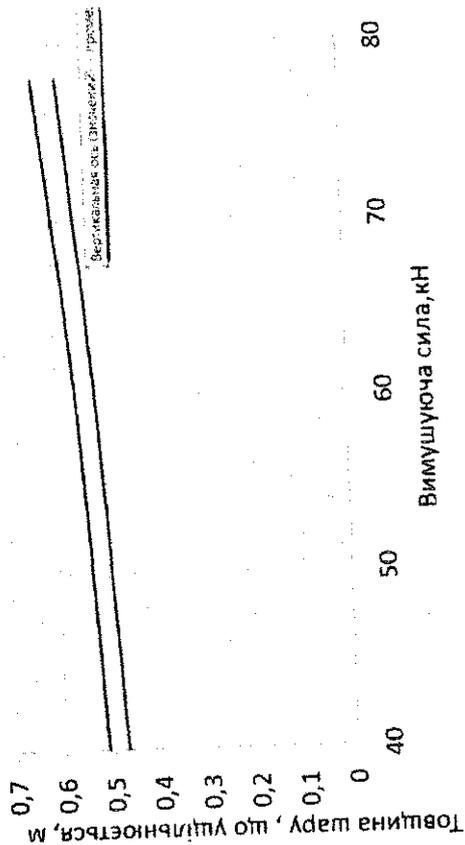


Рисунок 2.19 – Процесс монтажа бандажу на коток

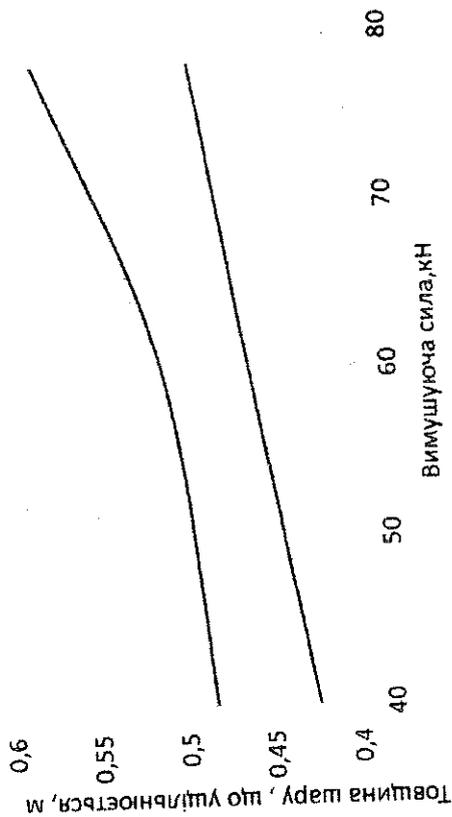
Caterpillar CB434D XW



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.20— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Caterpillar CB434D XW з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

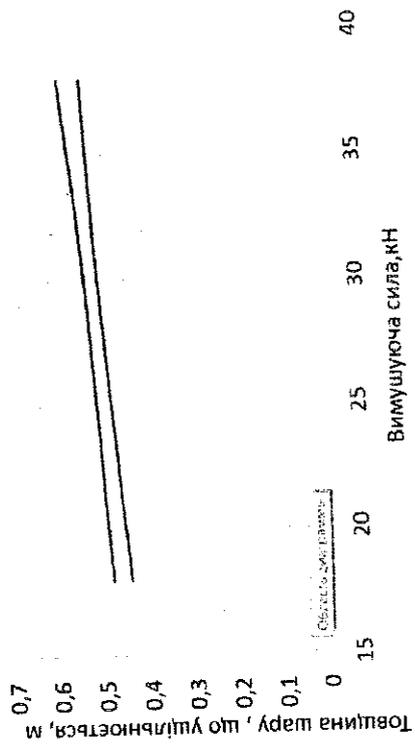
ДУ-98



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.21— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка ДУ-98 з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

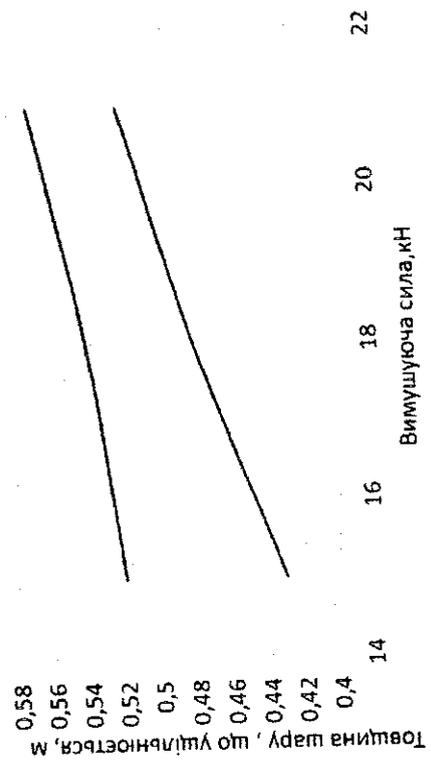
Shantui sr04d-5



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

**Рисунок 2.23— Залежність товщини шару, що утворюється в зоні активної дії котка Shantui sr04d-5 з гладкою поверхнюю та з кулачковим бандажем**

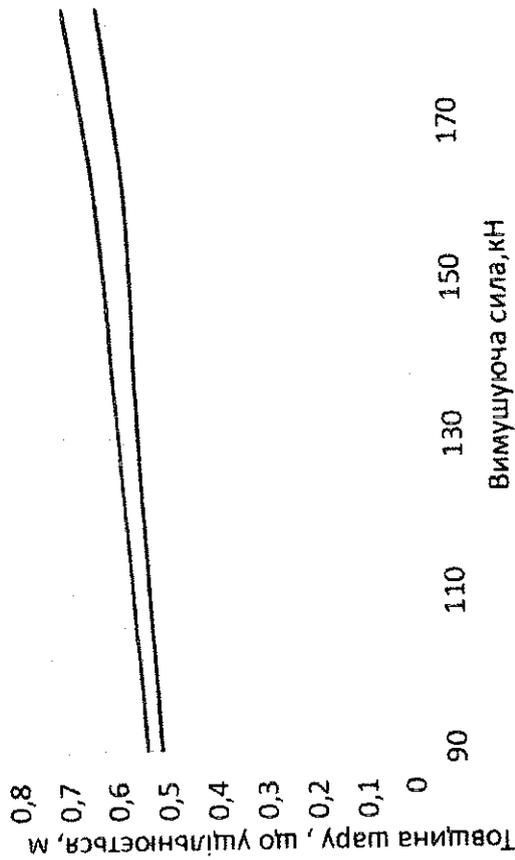
Hitachi XC35T



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

**Рисунок 2.22— Залежність товщини шару, що утворюється в зоні активної дії котка Hitachi XC35T з гладкою поверхнюю та з кулачковим бандажем**

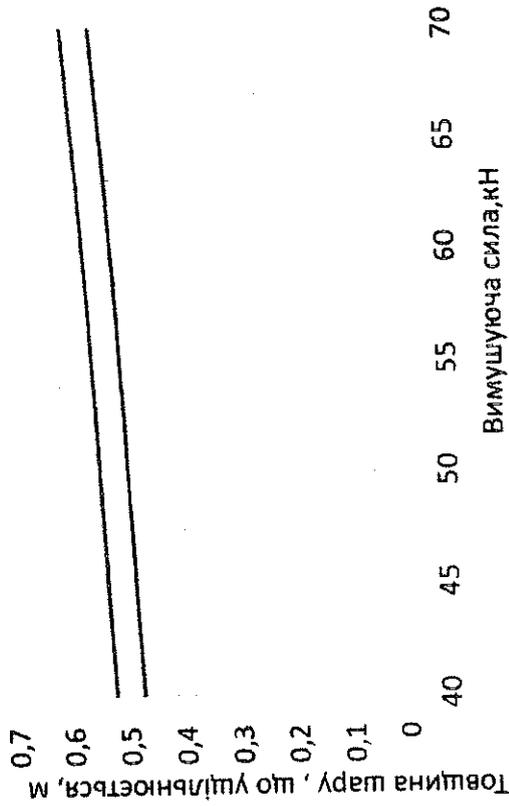
### Volvo DD132HF



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.24— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Volvo DD132HF з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

### Volvo BM 154 AP4



— для гладкої поверхні котка — для котка з кулачковим бандажем

Рисунок 2.25— Залежність товщини шару, що ущільнюється в зоні активної дії котка Volvo BM 154 AP4 з гладкою поверхньою та з кулачковим бандажем

## Висновки

У даному дослідженні вивчався процес ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою вібраційних котків з варіацією зусиль вібрації. Аналіз наявних досліджень, що зосереджені на обладнанні та технології ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей, а також на закономірностях зміни характеристик дорожніх матеріалів під час укатки, дозволяє сформулювати наступні висновки:

— Більшість сучасних засобів ущільнення характеризуються обмеженою універсальністю і вузьким діапазоном варіювання силових впливів на шар асфальтобетонної суміші. Це знижує їх ефективність з точки зору продуктивності та витрат на укатку, а також ускладнює досягнення якісного дорожнього покриття.

— Для підвищення ефективності технології ущільнення необхідно оптимізувати параметри вібрації. Це допоможе усунути недоліки існуючих дорожніх котків і розширити їх застосування в різних температурних умовах укатки.

— Розглянуто математичну модель, що описує процес взаємодії робочих органів котків з дорожнім покриттям. Ця модель дозволяє визначити оптимальні параметри котка для ущільнення та налаштування його режиму при укатці конкретної асфальтобетонної суміші.

— Запропоновано методику розрахунку параметрів впливу вібраційного котка, базуючися на зміні зусиль вібрації в залежності від товщини шару асфальтобетону, що ущільнюється в зоні активної дії вібрації.

— Для досягнення найбільшої ефективності ущільнення певної асфальтобетонної суміші важливо встановити залежності її міцності від щільності та температури в межах, відповідних укатці дорожніх покриттів.