

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

**ДУБИК ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 625.717.02 (043.5)

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ, ВІДНОВЛЕНИХ ЗА  
ТЕХНОЛОГІЄЮ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛІНГУ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Талах Світлана Михайлівна

Київ – 2017

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Загальна характеристика способів холодного ресайклінгу дорожніх одягів нежорсткого типу.....	13
1.2 Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду застосування технології холодного ресайклінгу.....	16
1.3 Аналіз теоретичного, експериментального та практичного досвіду конструювання і розрахунку нежорстких дорожніх одягів.....	23
1.4 Висновки за розділом 1.....	34
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ НЕЖОРСТКОГО ТИПУ.....	36
2.1 Теоретичні основи методики чисельного розрахунку нежорстких дорожніх одягів при врахуванні граничного стану рівноваги ґрунтового півпростору.....	36
2.2 Основні співвідношення МСЕ при розрахунку і конструюванні нежорстких дорожніх одягів.....	49
2.3 Основні співвідношення МСЕ з використанням МССЕ.....	53
2.4 Алгоритм розрахунку та модель загального процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів.....	58
2.5 Висновки за розділом 2.....	64
РОЗДІЛ 3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ARDO ТА ТЕСТОВІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКИХ ПЛИТ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ.....	66
3.1 Загальні принципи обчислювального комплексу.....	66

3.2	Опис математичних моделей аналітичного розв'язку тестових задач.....	69
3.3	Тестова задача розрахунку на міцність необмеженої плити під дією рівномірно розподіленого по кругу навантаження.....	71
3.4	Плоска задача визначення розподілу напружень між шарами конструкції дорожнього одягу при взаємодії з ґрунтовою основою.....	75
3.5	Згин рівномірно навантаженої прямокутної пластинки з вільним опиранням по краю.....	79
3.6	Висновки за розділом 3.....	85
<b>РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ТА ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО ДОСЛІДЖЕННЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ.....</b>		
4.1	Результати аналітичних розрахунків нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400).....	86
4.2	Результати чисельних експериментів по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400).....	96
4.3	Дослідження розвитку і поширення залишкових деформацій на після виконання холодного ресайклінгу.....	115
4.4	Оцінка економічної ефективності.....	124
4.5	Аналітичний розрахунок відновленої дорожньої конструкції на автомобільній дорозі Чугуїв-Великий Бурлук.....	128
4.6	Чисельне дослідження НДС та підбір оптимальної товщини шару ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-Великий Бурлук.....	134

4.7	Оцінка ступеня достовірності результатів моделювання НДС нежорстких дорожніх одягів.....	139
4.8	Висновки за розділом 4.....	142
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	144
	ЛІТЕРАТУРА.....	147
ДОДАТОК А	Алгоритм обчислювального програмного комплексу ARDO.....	165
ДОДАТОК Б	Результати аналітичного розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400).....	200
ДОДАТОК В	Геометричні характеристики та розподіл навантажень від розрахункових автопоїздів.....	205
ДОДАТОК Г	Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук.....	207
ДОДАТОК І	Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	217

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Проблеми дорожньої інфраструктури виникли одразу з початком будівництва доріг. Вони полягають у створенні умов для експлуатації покриття, інженерного облаштування доріг для створення інформаційного середовища, захисту доріг від впливу природно-кліматичних чинників, вирішенні технологічних і організаційних питань з будівництва доріг.

Із вдосконаленням транспортних засобів і підвищенням розрахункової швидкості руху ці проблеми стають ще більш відчутними незалежно від того, де прокладені дороги і в якій країні.

Зі збільшенням швидкості руху безумовно зростає інтенсивність. Внаслідок цього відбувається вимогливіше ставлення до рівності та шорсткості дорожнього покриття.

Суттєве підвищення вантажопідйомності транспортних засобів приводить до суттєвих навантажень на дорожній одяг та пошуку нових матеріалів і технологій по влаштуванню покриттів та основ.

При відновленні пошкоджених дорожніх одягів найбільш ефективними і економічно вигідними технологіями виявляються ті, які враховують конкретні умови. Тому дуже важливим завданням перед вченими-дорожниками та інженерами є вибір технології, яка відповідатиме умовам саме даного регіону. Для України найбільш поширеними є конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу. Серед сучасних технологій відновлення нежорстких дорожніх одягів найбільш передовою є технологія холодного ресайклінгу. Автомобільні дороги України, які запроектовані на навантаження 60 кН/вісь, швидко руйнуються, оскільки більшість сучасних автотранспортних засобів мають дещо інші розрахункові параметри (100 – 130 кН/вісь). Тому проблема сьогодення – це підвищити вимоги до транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг. У зв'язку з цим виникає потреба розробки оптимальної конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу. Вибрати оптимальну конструкцію дорожнього одягу практично неможливо без оцінки її міцності та деформативності. На основі

оцінки напружено-деформованого стану (НДС) дорожньої конструкції приймаються рішення про: необхідність виконання ремонтно-відновлювальних робіт за тією чи іншою технологією та призначення товщини конструктивних елементів дорожнього одягу.

Спеціалісти дорожньої справи в Україні для проектування конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу використовують нормативний документ ВБН В.2.3 – 218 – 186 – 2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу» [1]. Незважаючи на те, що ці норми найбільш чітко відповідають поставленим задачам, все одно вони мають цілий ряд недоліків. Тому при призначенні товщини шару відновлення дорожньої конструкції недостатньо використовувати тільки нормативний документ [1]. Діючі норми на проектування автомобільних доріг передбачають розрахунок дорожнього одягу на дію максимального розрахункового навантаження на вісь, яке становить 130 кН [2]. Однак нормативний документ [2] лише зовсім недавно набрав чинності. До цього часу в розрахунках дорожніх одягів нежорсткого типу приймалось максимальне осьове навантаження, яке дорівнює 115 кН і до сьогоднішнього дня не було розроблено ефективного розрахункового апарату, який би дозволив виконувати визначення НДС від дії автотранспортних засобів з навантаженням 130 кН на вісь.

Одним із критеріїв міцності, за яким здійснюється розрахунок дорожнього одягу, є допустимий пружний прогин [1]. Однак, як відомо, дорожня конструкція нежорсткого типу не працює в чисто пружній стадії. Тут має місце поступове накопичення залишкових деформацій, що призводить до прискореного утворення тріщин, хвиль, колій та інших деформацій.

В нормах [1] при розрахунках дорожньої конструкції нежорсткого типу на динамічне навантаження вводиться коефіцієнт динамічності, який є постійною величиною і має значення, що дорівнює 1,3. Однак подібний підхід є зовсім незрозумілим, тому що коефіцієнт динамічності не є постійним, а залежить від швидкості руху транспортних засобів.

Враховуючи вищенаведене, виникає необхідність у застосуванні принципово нового підходу до розрахунку і конструювання дорожніх одягів при застосуванні сучасних технологій відновлення (таким новим підходом може бути застосування ефективних варіантів методу скінченних елементів (МСЕ) до розрахунку дорожньої конструкції нежорсткого типу).

Вдосконалення наукової бази по забезпеченню високої надійності і довговічності автомобільних доріг є надзвичайно важливою і актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження теоретично-експериментального характеру виконано згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Навчально-наукового інституту Аеропортів Національного авіаційного університету за напрямками:

- удосконалення методів проектування реконструкції та експлуатації аеродромів та автодоріг з використанням новітніх комп'ютерних технологій;
- розрахунок аеродромних і дорожніх покриттів із врахуванням зростання ваги та габаритних розмірів рухомого складу вантажних автомобілів і злітної ваги вітчизняних та закордонних надважких повітряних суден.

Дисертація спрямована на реалізацію «Концепції Державної цільової програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 р.» (постанова Кабінету Міністрів України (КМУ) від 8.08.2012, №771), «Транспортної стратегії України на період до 2020 р.» (розпорядження (КМУ) від 20.10.2010, №2174), «Концепції сталого розвитку населених пунктів України» (постанова Верховної Ради України від 24.12.99, №1359 – XIV), Указу Президента України «Про пріоритетні завдання у сфері містобудування» (13.05.1997, №422) та принципів сталого розвитку населених пунктів України (Закон України «Про основи містобудування», №2257-III). Дисертаційне дослідження пов'язане з тематикою науково-дослідної роботи, яка виконувалась у Національному авіаційному університеті: «Методологія реконструкції об'єктів аеропортів у складних інженерно-геологічних умовах

України» (№667 – ДБ10, № держ. реєстрації НДР 0110U000220, 2010 – 2011 рр.), магістерськими програмами й спецкурсами.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* дослідження є визначення НДС нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу з урахуванням просторового характеру прикладання навантаження від дії надважких автотранспортних засобів у пружно-пластичній постановці задачі.

*Основні задачі дослідження:*

1. Виконати аналіз вітчизняного та закордонного досвіду застосування технології холодного ресайклінгу та проаналізувати теоретичний, експериментальний та практичний досвід розрахунку нежорстких дорожніх одягів.

2. Удосконалити розроблені на основі МССЕ алгоритми розрахунку та моделі загального процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів при взаємодії з ґрунтовою основою.

3. Реалізувати чисельний алгоритм шляхом доповнення програмного комплексу автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій (KARTPK) розділом автоматизованого розрахунку дорожніх одягів (ARDO).

4. Розробити розрахункові схеми, що моделюють конструктивні особливості нежорстких дорожніх одягів та їх взаємодію з неоднорідним багат шаровим ґрунтовим півпростором.

5. Розв'язати прикладні задачі для реальних транспортних об'єктів за допомогою розробленої програми.

**Об'єкт дослідження** – закономірності процесу деформування шарів дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу.

**Предмет дослідження** – НДС шарів нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу.



**Методи дослідження.** Методологічною основою дисертаційної роботи є застосування МСЕ, а саме найбільш ефективного його варіанту – МССЕ при розрахунку і конструюванні дорожніх одягів нежорсткого типу, відновлених за технологією холодного ресайклінгу. Також в роботі використані методи: аналітичного розрахунку; прогнозування залишкових деформацій в шарах конструкцій нежорстких дорожніх одягів; індукції та дедукції.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Удосконалено існуючий підхід до дослідження НДС нежорстких дорожніх одягів на основі співвідношень МССЕ.

2. Удосконалено процеси моделювання НДС нежорстких дорожніх одягів у фізично та геометрично нелінійній постановці.

3. Удосконалений алгоритм та розроблений пакет автоматизованих програм для обчислення напружень, переміщень і деформацій в елементах конструкцій нежорстких дорожніх одягів при взаємодії з однорідною та неоднорідною ґрунтовими основами, що дало можливість визначити НДС у просторовій постановці задачі при врахуванні впливу від надважких автотранспортних засобів.

4. За результатами чисельних експериментів по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів встановлено певні оптимальні варіанти конструкцій.

**Обґрунтованість і достовірність** результатів дисертаційної роботи забезпечується співставленням отриманих чисельних результатів розрахунків напружень, переміщень та деформацій в конструкціях нежорстких дорожніх одягів з результатами тестових задач, отриманих іншими вченими аналітичним, чисельним та експериментальним шляхом. Результати дисертаційного дослідження пройшли перевірки на дотримання умов рівноваги, умов сумісності деформацій, граничних умов.

**Практичне значення роботи** полягає у створенні алгоритмів, удосконаленні методу і комплексу прикладних програм на основі реалізації розроблених моделей, які дають можливість виконати на ЕОМ всі необхідні

чисельні експерименти для аналізу НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу.

За допомогою програмного комплексу ARDO розв'язано наступні задачі, а саме:

- дослідження НДС нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400), де регенований шар служить як основа;

- дослідження НДС нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв – Великий Бурлук, де відновлений шар був влаштований як покриття.

**Впровадження результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи були використані:

- Українським державним інститутом по проектуванню об'єктів дорожнього господарства «Укрдіпродор» при дослідженні НДС нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400);

- ТОВ «КИЇВАВІАПРОЕКТ» при розробленні проектної документації по Міжнародному аеропорту «Бориспіль» (був використаний програмний комплекс KARTPK при розробленні проектних пропозицій по влаштуванню під'їзної дороги з асфальтобетонними покриттями до терміналу «D»);

- кафедрою реконструкції аеропортів та автошляхів Навчально-наукового інституту Аеропортів Національного авіаційного університету при викладанні курсу «Будівельна механіка (спецкурс)» та виконанні 2-х магістерських робіт.

#### **Особистий внесок здобувача:**

Усі результати, що наведені в дисертаційній роботі, одержані здобувачем особисто або за його безпосередньою участю. Основні положення дисертаційної роботи відображені в публікаціях автора: [70] – застосований МСЕ для розрахунку на міцність захисних залізобетонних об'єм безнапірних труб дощових мереж від дії дорожнього покриття та тиску тягача НК-80; [63, 64] – проаналізований вітчизняний та закордонний досвід застосування

технології холодного ресайклінгу та теоретичного, експериментального і практичного досвіду розрахунку нежорстких дорожніх одягів; [149, 150] – проаналізовані результати аналітичного розрахунку нежорстких дорожніх одягів при застосуванні технології холодного ресайклінгу; [77] – запропонована методика та розв’язані тестові задачі по моделюванню НДС конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу при взаємодії з ґрунтовою основою; [72] – наведені результати розрахунку накопичення і розвитку залишкових деформацій в конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу; [71] – на основі співвідношень МССЕ та критерію текучості Мізеса виконані дослідження НДС дорожнього одягу при взаємодії з неоднорідною ґрунтовою основою; [73, 76] – застосований програмний комплекс KARTPK до визначення НДС шаруватих систем при наявності слабких ґрунтових основ; [137] – розроблено розрахункові схеми, які моделюють конструктивні особливості нежорстких дорожніх одягів та їх взаємодію з ґрунтовим півпростором; [151] – запропонована математична модель розрахунку нежорсткого дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу та армованого геосинтетичним матеріалом; [122] – розглянуто фізичні моделі реологічних процесів в конструкціях дорожніх одягів нежорсткого типу; [74] – на основі чисельного моделювання досліджено ступінь впливу параметрів дорожньої конструкції на її НДС під дією розрахункового навантаження; [75] – виконаний аналіз впливу розвитку пружно-пластичних деформацій на НДС однорідного ізотропного ґрунтового півпростору під нежорсткими дорожніми одягами з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності; [140] – запропонована фізична модель загального процесу нелінійного деформування нежорстких дорожніх одягів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах» (Київ, НТУ, 4 – 5 квітня 2013 р.); XVI, XVIII Міжнародних наукових

конференціях молодих вчених та студентів «Наука – майбутнє Литви. Інженерія транспорту та організація перевезень» (Вільнюс, Литва, 4 – 5 травня 2013 р., 4 – 5 травня 2015 р.); I, II Міжнародних науково-практичних конгресах «Міське середовище – XXI сторіччя. Архітектура. Будівництво. Дизайн» (Київ, НАУ, 10 – 14 лютого 2014 р., 15 – 18 березня 2016 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Аеропорти – вікно в майбутнє» (Київ, НАУ, 16 – 17 червня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців» (Харків, ХНАДУ, 6 листопада 2014 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Архітектура та екологія» (Київ, НАУ, 17 – 19 листопада 2014 р.); Всеукраїнській Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій» (Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 18 березня 2015 року); XII Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2015» (Київ, НАУ, 28 – 29 квітня 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 робіт, зокрема 6 статей у фахових періодичних виданнях України, з них 1 стаття, що індексована в міжнародній науково-метричній базі Index Copernicus.

**Обсяг та структура роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 154 найменувань на 18 стор., 5 додатків на 56 стор., 51 рис. і 21 табл. Загальний обсяг дисертації – 220 стор., основного тексту – 146 стор.

## РОЗДІЛ І

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Загальна характеристика способів холодного ресайклінгу дорожніх одягів нежорсткого типу

Погіршення стану дорожніх одягів є одним із найактуальніших питань як в Україні, так і за кордоном. Існуюча мережа автомобільних доріг України має незадовільний транспортно-експлуатаційний стан. На даний час термінового ремонту потребують 80 % мережі автомобільних доріг в Україні. Враховуючи ту обставину, що оновлення експлуатаційного стану автомобільних доріг фінансується лише на 20 % від необхідної потреби, виникає необхідність визначення найкращого варіанту ремонту конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу.

Серед сучасних варіантів відновлення нежорстких дорожніх одягів найбільш поширеними є:

- технологія холодного ресайклінгу;
- традиційна технологія, яка передбачає: видалення покриття існуючої дороги і будівництво нового на цьому самому місці або ж нанесення додаткових шарів дорожнього одягу на існуючу поверхню;
- технологія по влаштуванню покриттів на основі литого асфальтобетону.

Економічні розрахунки показали низьку ефективність варіантів традиційної технології відновлення конструкцій нежорстких дорожніх одягів [3].

Застосування технологій по влаштуванню покриттів на основі литого асфальтобетону є занадто дорогою справою для нашої держави. Як наслідок, вона дуже рідко застосовується при виконанні ремонту чи реконструкції автомобільних доріг в Україні. Варіант відновлення конструкцій нежорстких дорожніх одягів із застосуванням технології холодного ресайклінгу має певні

переваги перед повною реконструкцією і нанесенням додаткових шарів на існуючу поверхню:

- економічність;
- висока якість відновленого дорожнього одягу;
- невелика тривалість будівельних робіт;
- мінімальна деформація земляного полотна.

Тому завдяки цьому холодний ресайклінг широко застосовується в різних країнах [3, 4, 5].

Окрім холодного, існує і гарячий ресайклінг, суть якого полягає в тому, що існуючий асфальтобетон розігрівається тепловою енергією інфрачервоного випромінювання з подальшим подрібненням шляхом гарячого фрезерування. Після цього іде процес змішування, розподілення та ущільнення суміші. Однак технологія гарячого ресайклінгу має декілька значних недоліків, а саме:

- розігрівання асфальтобетону тепловою енергією інфрачервоного випромінювання наносить значну шкоду навколишньому середовищу;
- на розігрівання асфальтобетону витрачається велика кількість енергії, що робить дану технологію економічно не вигідною;
- низька довговічність відновленого дорожнього одягу.

Враховуючи вищенаведені недоліки, багато країн Західної Європи наприкінці 80-х рр. ХХ століття майже відмовились від відновлення конструкцій нежорстких дорожніх одягів за допомогою технології гарячого ресайклінгу, а на перший план вийшов холодний спосіб відновлення.

Холодний ресайклінг – це сучасна прогресивна технологія відновлення дорожнього одягу, суть якої полягає у фрезеруванні зношених дорожніх одягів, змішуванні подрібненого матеріалу із в'язучими речовинами та укладанні нового покриття на попереднє місце з подальшим його ущільненням і влаштуванням замикаючого шару.

Реалізувати технологію холодного ресайклінгу неможливо без застосування спеціальної машини – ресайклера, основним робочим органом якого є фрезерно-змішувальний барабан (рис. 1.1). Обертаючись проти

напряму руху машини, фрезерний барабан руйнує дорожній одяг з подальшим його подрібненням, змішуванням з водою та бітумною емульсією.

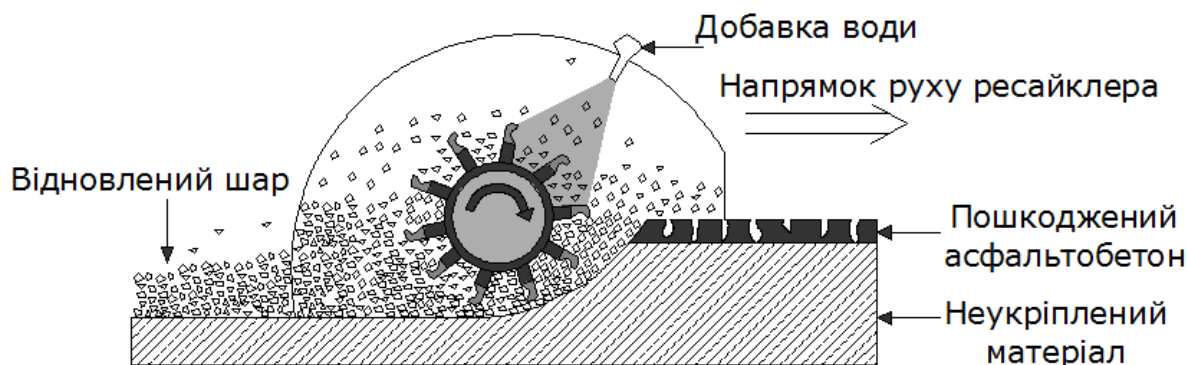


Рис. 1.1 Схема ресайклінгу

Після цього відбувається планування відновленого шару за допомогою автогрейдера з подальшим ущільненням віброкатками або пневмокатками. Завершується технологічний процес укладанням замикаючого шару.

Існує три варіанти здійснення холодного ресайклінгу:

- на місці;
- на заводі;
- комбінований варіант.

Регенерація на місці передбачає здійснення всіх технологічних операцій безпосередньо на місці виконання ремонтно-відновлювальних робіт [3–6].

Ресайклінг на заводі передбачає застосування змішувачів стаціонарного і напівстаціонарного типу. Перевага такого варіанту полягає в тому, що тут є можливість здійснювати високий контроль якості матеріалів, які входять в склад асфальтобетонної суміші. Однак регенерація на заводі має один дуже значний недолік – наявність транспортних витрат, що робить дану технологію економічно не вигідною. Тому зараз в багатьох країнах світу майже відійшли від ресайклінгу на заводі, а на передній план вийшла регенерація на місці і комбінований варіант відновлення дорожнього одягу.

Вибір того чи іншого варіанту холодної регенерації залежить від району розташування автомобільної дороги, топологічних і гідрогеологічних умов та доступності потрібних матеріалів [4].

Холодна регенерація здійснюється з використанням органічних, неорганічних та комбінованих в'язучих речовин. Вибір в'язучого, так само як і вибір варіанту холодного ресайклінгу, є дуже складним і важливим завданням, яке стоїть перед інженерами.

В якості органічних в'язучих використовують бітумну емульсію або ж спінений бітум. Бітумна емульсія, зазвичай, складається з 60 % бітуму і 40 % води. Однак доля бітуму може коливатися від 30 до 70 %.

Застосування спіненого бітуму супроводжується процесом спінювання із додаванням приблизно 2% води від загальної маси при температурі в'язучого 160-180 °С. В цьому випадку вода розширюється в 1500 разів порівняно з початковим станом.

В якості неорганічних в'язучих речовин може застосовуватися цемент або вапно. Цей вид в'язучих речовин додається з єдиною метою – підвищити міцність на стиск дорожнього одягу.

Останнім часом як в Україні, так і за кордоном широко застосовують комбіновану в'язучу речовину (бітумна емульсія + цементно-водна суспензія) [3–6]. Дорожній одяг із фрезерованого асфальтобетону, який укріплений комплексним в'язучим, має підвищену стійкість до утворення деформацій. Це пояснюється тим, що в такому матеріалі мають місце одночасно коагуляційні та кристалізаційні зв'язки, які надають відновленому матеріалу деякі специфічні властивості [6, 7–9]. Однак досвід реалізації технології холодного ресайклінгу із застосуванням комбінованих в'язучих в різних країнах є невеликий, оскільки відсутні чіткі практичні рекомендації, які мають бути розроблені на основі комплексних наукових досліджень.

## **1.2. Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду застосування технології холодного ресайклінгу**

Вперше технологія холодної регенерації була застосована у Великобританії [4, 5]. Однак шари відновленої конструкції дорожнього одягу за



такою технологією мали низьку довговічність [4–6].

Особливого розвитку холодний ресайклінг дорожніх одягів набув у США наприкінці 70-х років, коли була створена Асоціація по регенерації і відновленню асфальтобетонних покриттів [4–6].

Основною проблемою, з якою стикалися дорожники, було змішування асфальтового грануляту з необробленими кам'яними матеріалами.

У 80-х і 90-х роках в США з'явилося нове покоління машин для здійснення холодної регенерації. На початку 80-х років фірма Barber-Green в США розробила роторний профілювальник. Ця машина одночасно рихлювала старе покриття дорожнього одягу та змішувала асфальтовий гранулят із в'язучими речовинами. Наприкінці 80-х років в США широко застосовувалася фреза фірми Bomag, яка фрезерувала старе покриття на глибину 25 см [5, 6, 10].

Починаючи з 80-х років, значного розвитку технологія холодної регенерації набуває і у Франції. В цій країні дана технологія розвивалася завдяки діяльності фірм SCREG, Colas та Veugnet [5, 6].

Починаючи з 1986 року, у Франції холодна регенерація здійснювалася декількома способами, а саме: Новакол, Факір, Режешап, Флексосім та Ресікол. Для кожного способу та чи інша фірма розробляла свій унікальний комплект машин і механізмів. Вищенаведені способи здійснення холодної регенерації можна згрупувати за типом в'язучої речовини, яка використовується: Новакол, Режешап та Ресікол – з додаванням бітумної емульсії; Факір – з додаванням цементу; Флекосім – з додаванням комплексного в'язучого [5, 6].

В Німеччині технологія холодної регенерації почала застосовуватися з 1986 року, коли з'явився стабілізатор 2000VC-R, який міг здійснювати фрезерування покриття на глибину 30 см. В 1993 році німецька фірма Wirtgen створила змішувач-укладач CR4500, який міг обробляти смугу шириною від 3 до 4,5 м, а в 1994 році випустила ресайклер WR2500 [5, 6]. Машина WR2500 здійснювала ресайклінг дорожніх одягів на ширину 2,5 м. При цьому використовувалися різні види в'язучих речовин. Починаючи з 1996 року,

ресайклер WR2500 застосовується в Бельгії, Бразилії, Іспанії [5, 6]. Фірмою Wirtgen було розроблено мобільну установку КМА 150 для приготування холодних сумішей різного типу, а також установку для приготування цементно-водної суспензії WR1000 [5, 6].

В 1996 році в Норвегії фірма Nodest Vei виконала роботи по відновленню конструкцій нежорстких дорожніх одягів обсягом понад 400 тис. м<sup>2</sup>, застосовуючи при цьому ресайклер WR2500. В якості в'язучої речовини використовувався спінений бітум [5, 6].

В наш час розвиток технології холодного ресайклінгу як в Україні, так і за кордоном, йде шляхом пошуку нових в'язучих речовин і добавок [4, 5, 6]. В 1986 році французька фірма Colas запропонувала комбіновану в'язучу речовину, яка мала назву «Стабіколь». Вона являє собою суміш гідравлічного в'язучого з бітумною емульсією [5, 6].

В деяких країнах світу були розроблені рекомендації по розрахунку товщини відновлених шарів із застосуванням цементу [4, 5, 6].

В Росії технологія холодного ресайклінгу вперше була реалізована в 1996 році на магістральній дорозі М5 «Урал» [5, 6]. Глибина ресайклінгу складала 20 см. Відновлення конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу здійснювалося ресайклером WR2500 та суспензатором WM400 фірми Wirtgen. Ресайклінг здійснювався із використанням комбінованого в'язучого (бітум БНД 90/130 – 2,2-3 %; цемент М500 – 3,5-4 %; вода – 2%).

В 1996-1997 роках технологія холодного ресайклінгу була реалізована при реконструкції головної ділянки автомагістралі М1 «Беларусь» [5, 6].

Значний внесок в розвиток технології холодного ресайклінгу зробив російський вчений Бахрах Г.С [11–14], який досліджував властивості асфальтогренулобетону (АГБ), починаючи з 1985 року. Дослідженнями було показано, що найбільш високу відновлюваність мав АГБ на комплексному в'язучому. Були досліджені цементно-асфальтобетонні суміші, в яких змінювався склад бітуму і емульсії. Мінеральна частина складалася із піску та мінерального порошку. Підбір суміші проводили за методикою, яка була

прийнята для асфальтобетону. Результати досліджень зразків з деяких сумішей показали, що цементно-асфальтовий бетон має значно більші показники міцності, модуля пружності, водо- і морозостійкості порівняно з матеріалом на основі бітумної емульсії. Матеріал, який містив у своєму складі бітумну емульсію і цемент в якості в'язучих, в період свого формування менш чутливий до впливу погодно-кліматичних факторів [12, 14].

Бахрах Г.С. розглянув вплив руху автомобільного транспорту на міцність і деформативність шару із АГБ одразу після його влаштування [15]. Вчений зробив висновок, що в перші декілька днів після влаштування шару із АГБ відкриття по ньому руху автомобілів призводить до передчасного руйнування конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу. Тому Бахрах Г.С. рекомендує виконання укладки асфальтобетонного покриття по шару АГБ вже на наступну добу після влаштування останнього [15].

Білай Л.В. запропонувала спосіб регенерації асфальтобетону, який передбачав використання селективного очищення масляних фракцій нафти [16].

Значний внесок в розвиток технології холодної регенерації зробив видатний радянський вчений Алієв А.М. [17, 18]. Науковець досліджував вплив вмісту поверхнево-активної речовини ПАР-Д-І (поверхнево-активна речовина, яка використовується для очищення вод від нафти і нафтопродуктів) на фізико-механічні властивості регенованого асфальтобетону. Алієв А.М. показав, що введення цієї речовини в кількості 0,4 – 0,5 % від ваги асфальтобетону знижує температуру текучості в 2 рази, покращує властивості бітумів, а також забезпечує високу міцність при максимальних літніх температурах [17, 18].

Угорський вчений Кальман Адор'яні розробив модель «склад – властивості відновленого асфальтобетону» на основі проведених експериментальних досліджень. Науковець дійшов до висновку, що основним критерієм для порівняння ефективності технологій холодної регенерації є затрати енергії на виробництво комбінованого асфальтобетону [19]. Однак при порівнянні ефективності технології холодного ресайклінгу не можна обмежуватися лише одним критерієм. Необхідно комплексно враховувати

міцність, деформативність відновленої дорожньої конструкції, а також вартість та витрати енергії на виробництво комбінованого асфальтобетону.

Дослідженням властивостей АГБ із застосуванням асфальтового грануляту без додавання заповнювача займався німецький вчений Glet W. [20]. На основі результатів експериментальних досліджень науковець зробив висновок, що найбільш оптимальними є склади сумішей, які мають відношення цементу до бітуму (Ц/Б) від 40/60 до 50/50.

Процес формування структури АГБ на комплексному в'язучому досліджували такі вчені: Ребіндер П.А. [21], Риб'єв І.А. [22], Сюньї Г.К., Усманов К.Х., Файнберг Е.С. [23]. Цими дослідженнями було показано, що міцність коагуляційних зв'язків залежить від властивостей та товщини шару бітуму, а також від особливостей взаємодії мінеральних матеріалів із органічним в'язучим.

Веренько В.А. сформулював і довів гіпотезу про те, що в асфальтобетонах, отриманих із гарячих сумішей на основі органічно-гідралічних в'язучих, присутні міжфазові перехідні шари кластерного типу [24].

В Росії значний внесок в розвиток технології холодного ресайклінгу зробили такі вчені: Пахомов В.А. [25] та Шипицин В.В. [4].

Пахомов В.А. сформулював та вирішив задачу оптимізації підбору складу відновленого холодним способом асфальтобетону [25], а також обґрунтував варіанти конструктивних рішень шарів покриття з урахування термінів їх служби.

Російський вчений Шипицин В.В. у своїй роботі [4] обґрунтував застосування в технології холодного ресайклінгу повільно твердіючих мінеральних в'язучих і бітуму. Ним розроблені раціональні склади сумішей при застосуванні холодної регенерації, а також встановлені параметри технологічного процесу, які враховують комплексний вплив різних факторів на властивості конструктивних шарів дорожнього одягу. Він експериментально дослідив фізико-механічні властивості АГБ. Вчений показав, що найбільша

границя міцності при стиску АГБ досягається при вмісті бітуму за масою 1,5 % (при температурі  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Шипицин В.В. також дослідив вплив водо-цементного відношення на міцність АГБ. На підставі виконаних експериментальних досліджень він зробив висновок, що оптимальне водо-цементне відношення складає 0,4-0,5 з витратою 5,0 % цементу від маси асфальтового грануляту [4].

Вітчизняний досвід по технології холодного ресайклінгу є невеликим, тому що в Україні маловивченими залишаються фізико-механічні властивості фрезерованих асфальтобетонів. В нашій державі в сфері розвитку холодної регенерації при ремонті та реконструкції були розроблені нормативні документи [26, 27]. Розвиток технології холодного ресайклінгу в Україні пов'язаний з дослідженнями таких вчених, як Головка С.К. [28], Беспалий Є.А. [29], Сасько М.Ф., Копинець І.В. [30, 31], Говоруха О.В. [3].

Беспалий Є.А. вперше застосував і теоретично обґрунтував ефективність використання комплексного модифікатора феназол при регенерації асфальтобетону. Вчений встановив, що використання даного модифікатора дозволить отримувати регенеровані матеріали, які є кращими за своїми фізико-механічними характеристиками від асфальтобетонів на нових бітумах [29].

Український вчений Головка С.К. створив модель пошуку оптимального комбінованого АГБ, а також провів експериментальні дослідження по визначенню фізико-механічних характеристик відновленого матеріалу з різним вмістом повторно використаного асфальтобетону [28]. Це дає можливість раціональніше підійти до призначення оптимальної конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу при застосуванні технології холодної регенерації.

Сасько М.Ф. та Копинець І.В. займались визначенням раціональної технології фрезерування і формуванням раціонального складу основи. Вчені навели різні варіанти складу сумішей і їхні розрахункові характеристики [30, 31]. Дослідження, які проведені цими науковцями, дають можливість раціональніше підійти до питання призначення товщини основи при застосуванні технології холодного ресайклінгу.

Розвиток технології холодного ресайклінгу в Україні неможливо уявити без досліджень Говорухи О.В. та Жданюка В.К. [3, 32, 33, 34]. Говоруха О.В. експериментально встановив, що при ущільнюючому навантаженні 30 МПа і водо-цементному відношенні 0,4 досягаються найкращі фізико-механічні характеристики АГБ. Вчений вперше в Україні визначив розрахункові характеристики бетонів із холодних сумішей на основі фрезерованого асфальтобетону при температурі 0 °С, 10 °С та 20 °С з використанням неорганічних, органічних та комбінованих в'язучих. На основі цих досліджень була розроблена зміна №1 до відомчих будівельних норм [1] стосовно розрахункових характеристик відновлених матеріалів. Говоруха О.В. експериментально встановив, що зі збільшенням вмісту бітумної емульсії від 7 до 11 % у складі відновленого асфальтобетону відбувається підвищення показника глибини колії від 0,5 мм до 25 мм. Говоруха О.В. отримав залежність між показником глибини колії та границею міцності на стиск при температурі 50 °С [3]. Це дозволяє прогнозувати колієстійкість шарів дорожнього одягу ще на етапі попереднього підбору складу суміші при застосуванні холодного ресайклінгу.

Вчений також дослідив вплив виду і концентрації в'язучих на міцність зчеплення між шарами дорожньої конструкції. Говоруха О.В. на основі проведених експериментальних досліджень зробив наступний висновок: бетони на основі мінерального в'язучого мають більше значення міцності міжшарового зчеплення, ніж бетони на основі органічного та комбінованого в'язучого [3].

Отже, технологія холодного ресайклінгу в Україні є менш розвиненою, ніж за кордоном. Аналіз останніх досліджень і публікацій в сфері холодної регенерації нежорстких дорожніх одягів показав, що в Україні та світі протягом останніх тридцяти років значна увага приділялася таким напрямкам:

- удосконалення технології;
- удосконалення машин і механізмів для здійснення холодного ресайклінгу;
- удосконалення підходів до призначення складу ресайклірованої органо-

мінеральної суміші;

- розширення видів в'язучих речовин;
- удосконалення видів добавок.

Проте, на жаль, в Україні відсутні рекомендації по призначенню товщини шару відновлення при застосуванні органічних та комбінованих в'язучих, що неможливо без оцінки й визначення НДС дорожніх одягів. Тому в даній роботі пропонується приділити більшу увагу аналізу теоретичного, експериментального та практичного досвіду конструювання і розрахунку нежорстких дорожніх одягів в умовах застосування технології холодного ресайклінгу, а також розробці спеціального алгоритму розрахунку.

### **1.3. Аналіз теоретичного, експериментального та практичного досвіду конструювання і розрахунку нежорстких дорожніх одягів**

Розвиток досліджень в сфері розрахунку і конструювання нежорстких дорожніх одягів пройшов декілька етапів.

В кінці 30-х років ХХ ст. В.Ф. Бабков, А.К. Біруля, А.А. Іноземцев, М.Б. Корсунський досліджували розподіл напружень в ґрунті земляного полотна [35, 36]. Вчені знайшли напівемпіричні залежності, які дали можливість обчислювати вертикальні нормальні напруження і вертикальні переміщення по осі навантаження, що рівномірно розподілене по площі круга. Результатом цих досліджень є створений в 1943 р. метод розрахунку дорожніх одягів нежорсткого типу («Метод СоюздорНДІ»), який мав величезні переваги перед існуючими на той час закордонними методами, оскільки був чітко сформульований критерій граничного стану – максимальне вертикальне переміщення поверхні покриття. Було досліджено, що в деяких випадках дорожні конструкції, які розраховані за методом СоюздорНДІ, володіють зайвим запасом міцності [35, 36].

В 1942 – 1953 рр. Г.С. Шапіро, Б.І. Коган, Р.М. Раппопорт та Д. Бурмістр отримали точне рішення першої граничної вісесиметричної задачі теорії

пружності для багат шарового півпростору при дії нерухомого навантаження [35–38].

В цьому напрямку в СРСР наукові дослідження виконували такі вчені: М.М. Іванов, О.К. Біруля, М.Б. Корсунський, П.І. Теляєв, Ю.М. Яковлєв, В.Д. Казарновський, В.І. Барздо і ін. [39–46].

Значний внесок у розвиток теорії розрахунку нежорстких дорожніх одягів зробив Б.С. Радовський. Вчений запропонував перейти від розрахункової схеми шаруватого пружного півпростору при нерухомому навантаженні до шаруватого півпростору з в'язкопружними властивостями при рухомому навантаженні [38, 47–50].

В Радянському Союзі були розроблені такі методи розрахунку дорожніх одягів нежорсткого типу:

- метод МАДІ;
- метод, розроблений лєнінградським філіалом СоюздорНДІ;
- метод ХАДІ.

Метод МАДІ передбачає використання нормативного пружного прогину (модуля пружності) в якості розрахункового показника [35, 39]. При одноразовому прикладанні навантаження допустимий пружний прогин обчислюється за формулою:

$$l_{дон} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E_{нотр.}}, \quad (1.1)$$

де  $p$  – тиск, що передається від колеса розрахункового автомобіля на покриття;

$D$  – діаметр круга, який рівновеликий діаметру розрахункового відбитку колеса;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E_{нотр.}$  – потрібний модуль пружності, який визначається за залежністю:

$$E_{нотр.} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{l_{дон}}. \quad (1.2)$$



Згідно з методом МАДІ вважалось, що загальний прогин дорожньої конструкції при дії навантаження є повністю пружний. Однак це не так, оскільки в дорожній конструкції від впливу багаторазового навантаження виникають не тільки пружні, але й мікропластичні деформації, які з плином часу стають залишковими [37, 51–54].

Врахуванням залишкових деформацій в конструкціях нежорстких дорожніх одягів займалися такі вчені: О.П. Васильєв, М.С. Коганзон, Ю.М. Яковлєв, В.П. Матуа, С.В. Лугов, В.П. Плевако, В.М. Ряпухін, А.В. Гладкий, А.М. Онищенко, М.В. Гаркуша, А.С. Лапченко [52–60].

Згідно з методом, який був розроблений лєнінградським філіалом СоюздорНДІ, загальна товщина дорожнього одягу нежорсткого типу визначалась із умови (1.3) [35, 36]:

$$\tau_{a,\max} \leq [\tau_a] = K \cdot c, \quad (1.3)$$

де  $\tau_{a,\max}$  – найбільше розрахункове активне напруження зсуву в підстилаючому шарі ґрунту земляного полотна;

$[\tau_a]$  – допустиме напруження зсуву в ґрунті земляного полотна;

$c$  – величина нормального зчеплення в підстильному шарі ґрунту;

$K$  – комплексний коефіцієнт, який враховує особливості роботи конструкції.

Кафедрою будівництва і експлуатації автомобільних доріг Харківського автомобільно-дорожнього інституту під керівництвом професора О.К. Бірулі був розроблений метод ХАДІ. Згідно з цим методом, еквівалентний модуль пружності дорожнього одягу нежорсткого типу визначається за формулою:

$$E = \frac{p \cdot (1 - \mu^2)}{\lambda}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda$  – розрахункова відносна деформація дорожнього одягу [35–37].

Таким чином, всередині 50-х років ХХ століття конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу розраховувались як шаруваті пружні середовища під дією нерухомого навантаження [35–37, 52, 61–64].

Серед закордонних методів розрахунку найбільш поширеними є:

- метод Інженерного корпусу (США) [35–37, 52, 61–64];
- метод Шук і Фінн (США) [35–37, 52, 61–64];
- метод інституту Асфальтобетону (США) [35–37, 52, 61–64];
- метод, розроблений Центральною лабораторією Франції [35–37, 52, 61–64];
- метод, розроблений співробітниками нафтової компанії Шелл [35–37, 52, 61–64];
- метод Дорожньої дослідницької лабораторії (Англія) [35–37, 52, 61–64];
- метод, створений вченими Хейкелом і Кломпом (Нідерланди) [35–37, 52, 61–64];
- емпіричний метод розрахунку та конструювання дорожніх одягів AASHO (Американська Асоціація державних дорожньо-транспортних робочих) [35–37, 52, 61–64];
- чисельні методи (метод скінченних різниць, МСЕ, метод граничних елементів) [52, 61–78].

Найбільш поширеним з цих методів є емпіричний метод AASHO. Дослідження, які були проведені AASHO, є незалежними від теоретичних розробок і полягають в наступному: випробовувалися декілька сотень конструкцій дорожніх одягів при дії на них тягачів із причепами [35–37, 40, 52]. При цьому стан покриття кожної ділянки оцінювався експертами через кожні два тижні по п'ятибальній системі.

Однак метод AASHO мав чисто емпіричний характер без ніяких теоретичних передумов. У зв'язку з тим, що AASHO був виконаний значний обсяг експериментальних досліджень, постала проблема розповсюдити метод на інші кліматичні умови чи групу ґрунтів [35, 37, 52, 55].

Більшість закордонних методів використовують показник несучої здатності (*CBR*) ґрунту земляного полотна та матеріалів шарів основи [35, 37, 52]. Несуча здатність земляного полотна визначається за каліфорнійським

методом наступним чином: штамп діаметром 5 см вдавлюється зі швидкістю 1,25 мм/хв. на глибину 2,5 мм в зразок ґрунту, який поміщений в циліндр висотою та діаметром 20 см. Вимірний тиск зіставляють з типовим, який дорівнює 100 (в якості типового прийнятий тиск на штамп, який занурюється в щебінь) [35, 36].

Значний внесок в розвиток сфери розрахунку і конструювання нежорстких дорожніх одягів зробили такі закордонні вчені, як: Л.Фокс, Вільямс, Одемарк, Х. Мекке, Л.Найбур, Дж. Ферштратен і Ван Грін, Т. Ямануші та ін..

Для визначення напружень, переміщень і деформацій в конструктивних елементах дорожніх одягів нежорсткого типу за кордоном в 70-х роках ХХ століття були розроблені такі програми: ELZYM (Каліфорнійський університет), BISAR (компанія Шелл), CHEVRON (США), ALISE (Франція), РАК-81, які розглядали конструкції нежорстких дорожніх одягів як двошарові пружні середовища [38, 52]. Однак при приведенні багат шарової конструкції до двошарової виникає похибка в обчисленнях, яка становить 25 % за пружним прогином і 20 % за напруженнями розтягу в покритті [52].

Б.С. Радовський отримав вираз для визначення прогину поверхні покриття при дії рухомого навантаження на багат шаровий в'язко-пружний півпростір [37, 79]:

$$w = \frac{q \cdot a^2}{\eta \cdot \nu} \left[ e^{bl} \int_1^{l_0} e^{bU_1} f(U_1) dU + 3e^{cl} \sum_l^{l_0} f(U_1) dU_1 \right], \quad (1.5)$$

$$\text{де: } b = \frac{E \cdot a}{\eta \cdot \nu}; c = \frac{(6k + E) \cdot a}{\eta \cdot \nu}; l = \frac{X' - V_t}{a}; l_0 = \frac{X'}{a}; f(U_1) = \int_0^{\infty} I_1(\alpha) I_0(U\alpha) \frac{d\alpha}{\alpha}; E -$$

модуль пружності покриття;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості;  $k$  – модуль об'ємного стиску;  $a$  – радіус кола напружень;  $\nu$  – швидкість руху навантаження;  $q$  – інтенсивність рівномірного розподілу нормального навантаження;  $I_0, I_1$  – функції Бесселя першого роду першого та нульового порядку;  $\alpha$  – параметр інтегрування.

Визначенням НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів під дією багатоколісних багатовісних автотранспортних засобів в СРСР займався А.С. Супрун під керівництвом Б.С. Радовського. Вчений в роботі [38] розробив абсолютно новий розрахунковий апарат для визначення напружень, переміщень і деформацій. Це був значний поштовх для розвитку науки в даній сфері. Однак, на жаль, в рішеннях А.С. Супруна не враховувалося накопичення залишкових деформацій як в шарах покриття, так в шарах основи і ґрунту земляного полотна. Розробки вченого не знайшли відображення в сучасних нормах [1].

Дослідженням впливу багатоколісних автотранспортних засобів на НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів займалися такі закордонні вчені: А.С. Конорьов [80], О.В. Смирнов [81], Steit D.A., Wollyung R.J. [82], Heath A. [83]. А.С. Конорьов вивів формулу, яка дозволяла визначити значення коефіцієнту приведення транспортних засобів до розрахункового навантаження. Формула А.С. Конорьова має вигляд [80]:

$$S_m = b \cdot (c_1^v) \cdot (c_2^M), \quad (1.6)$$

де  $v$  – швидкість руху транспортного засобу, км/год;  $M$  – загальна вага транспортного засобу, т;  $b, c_1, c_2$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від індексу рівності покриття.

Кальонова К.В. займалась вдосконаленням методики розрахунку при проектуванні конструкцій нежорстких дорожніх одягів з асфальтобетонними покриттями [35]. Вченою було встановлено залежність між мінімальним потрібним модулем пружності дорожнього одягу і потрібною рівністю покриття, визначені коефіцієнти приведення для сучасного складу транспортного потоку та уточнені значення динамічних модулів пружностей асфальтобетону при різній тривалості дії навантаження. Кальонова К.В. розробила раціональний алгоритм розрахунку нежорстких дорожніх одягів, який мав цілий ряд недоліків, оскільки був побудований на основі методу, який є дуже схожий з тим, що наведений в нормах [1].

О.В. Смирнов розглядає НДС стан суцільних і шаруватих середовищ при динамічному ударі [81]. Вчений отримав статичне рішення задачі про вплив вертикального навантаження на шарувату конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу, а також вираз для визначення прогину під центром плити:

$$U = \frac{q \cdot a}{\mu} [K_3 \cdot I_{10}] = \frac{q \cdot 2a(1-\nu^2)}{E}. \quad (1.7)$$

Вдосконаленням методу проектування підсилення нежорстких дорожніх одягів з урахуванням перспективних навантажень займався Аміров А.Т. [84]. Вчений розробив розрахункову схему підсилення існуючого дорожнього одягу з урахуванням часткової втрати шаром, що підсилюється, «плитного ефекту» [84]. Аміров А.Т. встановив значення коефіцієнтів перевантаження для значної кількості автомобілів великої вантажопідйомності. Ці дослідження є дуже важливими і значно полегшують процедуру розрахунку конструкцій нежорстких дорожніх одягів на дію навантаження від надважких автотранспортних засобів.

Вивченням динамічних властивостей асфальтобетонів займалися такі вчені-дорожники: О.П. Васильєв, П.І. Теляєв, В.М. Ряпухін, В.І. Заворицький, Ю.М. Яковлєв, О.Т. Батраков [85–90].

Автоматизацією проектування і оптимізацією конструкцій нежорстких дорожніх одягів займалися такі вчені, як Г.Г. Лазаревич, К. Монісміт, О.Я. Тулаєв [91, 92].

Коливання плит нескінченних і скінченних розмірів на пружній основі, їх переміщення і напруження досліджували вчені: В.В. Філіпов, І.А. Медніков [93].

О.П. Васильєв розробив принципово нову методику розрахунку конструкцій нежорстких дорожніх одягів, суть якої полягає в тому, що потрібний модуль пружності визначався не за середньодобовою перспективною інтенсивністю руху, а за сумарною кількістю проходів автомобілів за термін служби дорожнього одягу [90, 94]. Вчений також досліджував процеси

нерівномірного пластичного деформування ґрунту земляного полотна під дією багаторазового транспортного навантаження.

Вивченням залишкових деформацій в шарах ґрунту земляного полотна займалися С.Ю. Канигіна та О.В. Жустарьова.

С.Ю. Канигіна в [95] обґрунтувала залежність величини залишкової деформації в глинистих ґрунтах від сумарного часу дії активних дотичних напружень. О.В. Жустарьова запропонувала методику обґрунтування необхідного ступеня ущільнення зв'язного ґрунту в робочому шарі земляного полотна з точки зору обмеження величини та інтенсивності накопичення залишкової деформації [96].

Прогнозуванням НДС ґрунтового масиву з використанням числових методів займалися: О.С. Городецький, М.Т. Кузло, В.В. Семенов, А.Н. Соколовський, С.Б. Ухов, А.Б. Фадєєв, В.А. Флорін, В.К. Цихановський [78, 97–99].

Розрахунком конструкцій нежорстких дорожніх одягів під дією багаторазового навантаженням у пружно-в'язко-пластичній постановці займався Л. Хвоїнський [100]. У роботі вченого враховувалося накопичення залишкових деформацій як в шарах покриття, так і в шарах основи. Однак Л. Хвоїнський не врахував фізичну і геометричну нелінійність роботи матеріалів шарів конструкції, а також інерційність рухомої маси, колісну формулу автомобіля і розташування транспортного засобу на проїзній частині, що є надзвичайно важливими параметрами при проектуванні конструкцій дорожнього одягу нежорсткого типу.

Значний вклад в розвиток методики розрахунку нежорстких дорожніх одягів зробили такі вчені як С.К. Іліополов та М.Г. Селезньов [95], які побудували новий метод вирішення крайової задачі для складних областей в просторовій постановці. Однак в дослідженнях цих науковців не був даний прогноз по накопиченню залишкових деформацій в елементах дорожньої конструкції.

В Україні розрахунком і конструюванням дорожніх одягів нежорсткого

типу займалися такі вчені: В.М. Ряпухін, І.П. Гамеляк, В.Я. Савенко, Н.В. Павленко, Н.О.Арсеньєва, В.О.Богомолов, В.К. Жданюк, С.В. Богомолов, В.О. Золотарьов, А.К. Приварников, Н.В. Довгополова, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угрімов, С.В. Долгополов і ін. [65, 67, 68, 85, 101–105]. Особливе місце належить І.П. Гамеляку, який провів широкомасштабні дослідження по оцінці надійності дорожніх одягів [103, 104]. Вчений розробив загальні теоретичні основи, а також матеріалознавчі, технологічні, конструктивні, експлуатаційні та економіко-організаційні способи підвищення оцінки надійності конструкцій дорожніх одягів.

На сучасному етапі розрахунок та конструювання дорожніх одягів нежорсткого типу в Україні регламентується нормативним документом [1], в Росії – [106], Білорусі – [107]. Згідно із нормами [1] розрахунок та конструювання дорожніх одягів нежорсткого типу здійснюється за трьома критеріями:

- допустимим пружним прогином;
- опором зсуву у ґрунтах і шарах із малозв'язних матеріалів;
- опором розтягу при згині.

Відомі вчені-дорожники В.О. Богомолов, С.В. Богомолов, В.К. Жданюк вказують на певні недоліки існуючої методики розрахунку і конструювання дорожніх одягів нежорсткого типу [108]:

- не має можливості отримати повні тензори напружень і деформацій в кожній точці півпростору;
- має місце проблема оцінки точності отриманих рішень;
- неможливо врахувати взаємний вплив колісної формули автомобіля та одночасний рух декількох автомобілів на НДС конструкцій дорожніх одягів;
- важко оцінити вплив міжшарового зчеплення на значення напружень, переміщень і деформацій в елементах конструкцій дорожнього одягу.

Встановлено, що для значної кількості транспортних засобів з відстанню між осями більше ніж 1,3 м, нормативне за ВБН В.2.3. – 218 – 186 – 2004 навантаження перевищує розрахункове. Це означає, що для доріг III категорії і

нижче, дозволений пропуск транспортних засобів з навантаженням на вісь, яке перевищує допустиме. За останні роки на автомобільних дорогах України суттєво зросла частка важких багатовісних багатоколісних автотранспортних засобів. Тому як для нових, так і для експлуатованих доріг додається проблема міжнародного транзиту, яка допускає навантаження до 130 кН/вісь.

Розрахунок дорожніх одягів нежорсткого типу згідно з сучасними нормами спирається на те, що конструкція працює чисто в пружній стадії. Однак в даному випадку мають місце й мікропластичні деформації, які неодмінно призведуть до виникнення залишкових.

Відсутність методу розрахунку, який би дозволяв розраховувати підсилення дорожнього одягу на навантаження, що перевищують розрахункові, стало основним мотивом для написання даної дисертаційної роботи. Тому в даній дисертаційній роботі при виконанні розрахунків конструкцій нежорстких дорожніх одягів пропонується використати чисельний метод – МСЕ, який відноситься до теоретичних. При розрахунку несучої здатності при запланованому варіанті відновлення МСЕ має ряд переваг, оскільки дозволяє врахувати багато параметрів конструкції.

МСЕ дозволяє використовувати ряд варіантів холодного ресайклінгу для ефективного укріплення дорожнього одягу.

В останній час зусилля багатьох вчених спрямовані на застосуванні чисельних методів. Цим питанням займалися такі науковці: В.М. Заворицький [109], Г.М. Васильков [110], Г.І. Глушков [111], І.В. Дем'янушко [112], В.І. Майоров [113], О. Зенкевич [114, 115], Л.М. Савельєв [116], Бате К., Вільсон Е. [117]. Дослідженням НДС дорожнього одягу нежорсткого типу з використанням співвідношень МСЕ в Україні займались: Н.О. Арсенєва [65], Н.В. Довгополова, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угрімов, С.В. Довгополов [118, 119, 120]. Вчені розглянули питання математичного моделювання НДС багатошарових пластин на пружній основі при статичному навантаженні.

В Україні використання МСЕ при розрахунку дорожніх одягів ще не набуло такого розвитку, як за кордоном. Розрахунку асфальтобетонних



покриттів на основі МСЕ з урахуванням термопластичних властивостей присвячені роботи Н.О. Арсеньєвої та Є.В. Дорожко [65, 121]. Науковці виконали розрахунок конструкцій дорожніх одягів у програмному комплексі ANSYS. За результатами чисельного моделювання НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів Н.О. Арсеньєва розробила розрахункові таблиці для визначення напружень в асфальтобетонних шарах покриття з урахуванням їх термопластичних властивостей [65]. Дорожко Є.В. виконав розрахунок НДС тонкого асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті. При цьому вчений врахував час дії транспортного навантаження та температурного деформування [121]. Однак використання програмного комплексу ANSYS при визначенні НДС дорожніх одягів може призвести до отримання спотворених результатів, оскільки не зрозуміло, яким чином тут виконується розрахунок на дію динамічного навантаження. ANSYS не дає можливості визначити вплив неоднорідностей ґрунтових основ на НДС конструкцій як жорстких, так і нежорстких дорожніх одягів. Не зовсім зрозуміло, як в даному випадку враховується просторовий характер прикладання навантаження та явище «хибного зсуву».

Особливе місце в галузі розрахунку і конструювання нежорстких дорожніх одягів займають дослідження відомого російського вченого В.П. Матуа [55, 56, 57]. Науковець здійснив свого роду революцію в сфері розрахунку і конструювання нежорстких дорожніх одягів. Вчений розробив чисельний метод рішення динамічних задач в просторовій постановці. Використовуючи МСЕ, В.П. Матуа отримав рішення задач про напруження і переміщення, які виникають в анізотропній і багатошаровій дорожній конструкції при рухомому навантаженні. Науковець виконав порівняльний аналіз НДС дорожніх конструкцій при використанні таких розрахункових моделей: плоска деформація, вісесиметрична і просторова постановки задачі [55]. В.П. Матуа дійшов до висновку, що для достовірного відображення роботи дорожньої конструкції в реальних умовах її експлуатації повинна бути використана просторова задача. Вчений дослідив динаміку накопичення

залишкових деформацій в поздовжньому і поперечному напрямках автомобільної дороги [52–54]. Матуа В.П. дослідив вплив висоти насипу, вологості, щільності ґрунту земляного полотна, температури асфальтобетонних шарів на НДС дорожньої конструкції під дією розрахункового навантаження.

Однак вчений не врахував у своїй методиці вплив неоднорідностей ґрунтових основ на НДС дорожніх одягів нежорсткого типу. Також на той час (2002 р.) розвиток технології холодної регенерації ще не досяг того рівня, коли б товщина шару ресайклінгу призначалася на основі розрахунків з використанням МСЕ. Результати розрахунків за методикою, яку розробив В.П. Матуа, можуть мати погану збіжність через неврахування явища «хибного зсуву». Тому, щоб ліквідувати цей недолік, пропонується застосувати співвідношення МССЕ для виконання розрахунків НДС дорожніх одягів нежорсткого типу.

Отже, розрахунок і конструювання нежорстких дорожніх одягів пройшов у своїй історії декілька етапів. Дослідження, які були проведені в цій галузі різними вченими в Україні, реалізувались у вигляді норм проектування ВБН В.2.3. – 218 – 186 – 2004 [1]. Однак методика розрахунку, що наведена в цих нормах, має цілий ряд недоліків і ніяким чином не може бути використана для розрахунку НДС відновлених нежорстких дорожніх одягів. Аналіз теоретичного, експериментального та практичного досвіду розрахунку та конструювання нежорстких дорожніх одягів показав, що до сьогодення не було розроблено універсального рішення по визначенню НДС шаруватих систем. В останній час все більше і більше вчених звертаються до МСЕ як до апарату, який дає можливість врахувати цілий ряд параметрів, що не враховуються за аналітичними методами.

#### **1.4. Висновки за розділом 1**

1. В останній час як в Україні, так і за кордоном під час ремонту і реконструкції дорожніх одягів нежорсткого типу широко застосовується

технологія холодного ресайклінгу, яка дозволяє найбільш ефективно використовувати матеріал старого дорожнього одягу та мінімально наносити шкоду оточуючому середовищу.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій в галузі холодного ресайклінгу нежорстких дорожніх одягів показав, що в Україні була приділена лише незначна увага удосконаленню методики розрахунку та визначенню НДС відновлених конструкцій. Як наслідок – не завжди призначається оптимальна товщина шару холодної регенерації виходячи з певних конкретних умов.

3. В Україні розрахунок на міцність конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу здійснюється згідно з нормативом [1]. Методика розрахунку і конструювання дорожніх одягів, що наведена в нормах [1], має цілий ряд недоліків. Тому в останній час все більше і більше вчених звертається до МСЕ при виконанні розрахунку НДС шаруватих систем. Чисельні методи розрахунку дають можливість комплексно врахувати вантажопідйомність, тип транспортного засобу, кількість осей, відстань між осями, тип дорожнього одягу, фізичну та геометричну нелінійність, взаємодію з ґрунтовою основою, просторовий характер прикладання навантаження та контактну взаємодію шарів, що неможливо зробити за аналітичними методами.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ НЕЖОРСТКОГО ТИПУ

#### 2.1. Теоретичні основи методики чисельного розрахунку нежорстких дорожніх одягів при врахуванні граничного стану рівноваги ґрунтового півпростору

В процесі експлуатації автомобільна дорога знаходиться під впливом значної кількості навантажень і впливів, які необхідно враховувати при проектуванні, будівництві, організації робіт по ремонту та утриманню. Постійно зростаюча маса і швидкості руху автомобільного транспорту викликають невинне зростання рухомого складу. Тому визначення НДС в дорожніх конструкціях має велике практичне значення.

Основний вплив на НДС дорожнього одягу нежорсткого типу викликають навантаження при русі, зупинці та стоянні автомобілів. При цьому виникають статичні та динамічні впливи.

Рух автомобільного транспорту викликає в дорожньому одязі вертикальні, горизонтальні та дотичні напруження, які мають найбільш великі значення при розгоні та гальмуванні автомобіля в зоні контакту шини колеса з покриттям. Сумарне навантаження від шин коліс розподіляється по опорній поверхні у вигляді еліпса. В центрі еліпса питома навантаження є максимальним, а по периметру – рівним нулю. Для спрощення процедури розрахунку, навантаження, що розподілене нерівномірно по поверхні еліпса, заміняють рівномірно розподіленим навантаженням по поверхні кола з діаметром, що обчислюється за формулою [1, 35, 38, 52, 106]:

$$D = \sqrt{\frac{40 \cdot Q_{\text{розрах}}}{\pi \cdot p}} \quad (2.1)$$

де  $Q_{\text{розрах}}$  – розрахункове навантаження, що передається колесом на пове-

рхню покриття;  $p$  – питомий тиск.

В НДС дорожній одяг проявляє комплекс складних властивостей: пружність, пластичність, повзучість, релаксацію напружень, зміна міцності, накопичення деформацій. Теоретична оцінка поведінки дорожньої конструкції під навантаженням здійснюється на основі опису НДС механічних моделей, основними з яких являються тіла Гука, Кельвіна, Ньютона, моделі Максвелла, Кельвіна, Фойгхта, Бінгема [37, 51, 52].

В теорії пружності розглядаються ідеалізовані матеріали, властивості яких лежать між абсолютно твердим тілом і ідеальною рідиною, що не стискається. Якщо в рівняння стану входить параметр часу, то маємо реологічне рівняння стану. Загалом в рівняння реологічного стану можуть входити вектори напружень, деформацій, швидкостей зміни напружень, швидкостей зміни деформацій, час, вологість, температура та параметри вібрації [52, 122]:

$$R(\sigma, \varepsilon, \sigma', \varepsilon', W, w) = 0. \quad (2.2)$$

Звичайно, що побудувати рівняння стану (2.2) практично неможливо, оскільки необхідно виконати надзвичайно велику кількість емпіричних досліджень. Тому на практиці використовуються достатньо спрощені моделі, які побудовані на основі певних допущень. В механіці твердого деформованого тіла відомі такі теорії:

- теорії пластичності;
- теорії граничної рівноваги;
- реологічні моделі.

Теорії пластичності мають недолік, який полягає в тому, що пластичні деформації в дорожній конструкції виникають миттєво, бо тут не присутній параметр часу.

В теоріях граничної рівноваги розрізняють два види напруженого стану: дограничний і граничний. В дограничному стані допускається, що тіло працює переважно пружно. В граничному стані досягається гранична рівновага між зовнішнім навантаженням і силами опору конструкції нежорсткого дорожнього

одягу. Матеріал знаходиться в стані, коли він втрачає здатність чинити опір збільшенню деформацій. При цьому відбувається руйнування структурних зв'язків між частинами ґрунту земляного полотна, що може привести до виникнення тріщин в монолітних шарах конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу. Умова виникнення граничного стану в дорожній конструкції називається гіпотезою міцності чи пластичності. На сьогодні відомо дуже багато різних гіпотез граничного стану для різних матеріалів. Основними з них є: критерій Мора-Кулона, критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна (для ґрунтів), критерій Мора, Писаренко-Лебедева (для крихких матеріалів), критерій Генієва (для бетонів) [51, 52, 123–127].

Основні формули граничного стану наведені в таблиці 2.1 [65, 102, 105, 127].

В дисертаційній роботі був використаний розширений критерій текучості Мізеса із урахуванням другого та третього інваріанту тензора-девіатора функції напружень через параметр Лоде-Надаї [71, 78], який представлений у формі:

$$f\left(\hat{\sigma}, \hat{S}, \gamma^p, \alpha, \varphi, c\right) = \frac{2}{3} I_1\left(\hat{S}^2\right) \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi\right)^2 - \left[\frac{1}{\sqrt{3}} I_1(\sigma) \sin \varphi - \sqrt{3} \cos \varphi\right]^2 = 0, \quad (2.3)$$

де  $\hat{\sigma}, \hat{S}, \gamma^p$  – тензори загальних напружень, напружень девіаторної частини і пластичних деформацій відповідно;

$\alpha, \varphi, c$  – параметр Лоде-Надаї, кут внутрішнього тертя ґрунту і питоме зчеплення відповідно.

Параметр Лоде-Надаї визначається за залежністю (2.4) [71, 78]:

$$\alpha = \frac{1}{3} \arcsin \left[ -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{I_3}{I_2^{3/2}} \right], \quad (2.4)$$

де  $I_3, I_2$  – третій та другий інваріанти тензора-девіатора напружень.

Другий та третій інваріанти тензора-девіатора напружень виражаються через перший за формулами (2.5) і (2.6).

## Гіпотези граничного стану

Назва гіпотези	Умова граничного	Область застосування
Критерій Мора	$\sigma_1 - \frac{R_p}{R_c} \sigma_3 = R_p$	Для крихких і кам'яних матеріалів
Критерій Писаренка-Лебедева (1)	$\sigma_{e1} = \chi \sigma_{e4} + (1 - \chi) \sigma_1$	Для широкого класу матеріалів
Критерій Писаренка-Лебедева (2)	$\sigma_{e2} = \chi \sigma_{e4} + (1 - \chi) \sigma_1 A^{\left(\frac{1-3\sigma_{сп}}{\sigma_{e4}}\right)}$	Для широкого класу структурно-неоднорідних матеріалів
Баландіна	$J_2 \leq \frac{1}{3} [R_c R_p - (R_c - R_p) J_1]$	Для скельних порід і кам'яних матеріалів
Мора-Кулона	$ \tau_n  \leq c + \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi)$	Для ґрунтів
Мізеса-Шлейхера-Боткіна	$\sigma_i \leq \frac{6 \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)} \left[ -\sigma_0 + \frac{c}{\operatorname{tg}(\varphi)} \right]$	Для ґрунтів
Критерій найбільших нормальних напружень	$\sigma_e = \sigma_3$	Для крихких матеріалів
Критерій найбільших лінійних деформацій	$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)}{E}$	Для крихких матеріалів
Критерій найбільших дотичних напружень	$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3$	Для матеріалів в яких однаковий опір розтягу та згину
Критерій питомої енергії формозміни	$\sigma_{e4} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$	Для пластичних матеріалів
<p>Позначення:  <math>\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3</math> – головні нормальні напруження; <math>R_p, R_c</math> – граничний опір розтягу і стиску відповідно; <math>\sigma_{e4}</math> – еквівалентне напруження згідно з четвертою теорією міцності;  <math>\chi</math> – параметр, який визначає внесок в деформування параметру зсуву;  <math>J_1, J_2, J_3</math> – перший, другий, та третій інваріант тензора-девіатора напружень відповідно;  <math>\sigma_n, \tau_n</math> – нормальне і дотичне напруження на площадці з нормаллю <math>n</math>;  <math>\varphi, c, \mu, E</math> – кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, коефіцієнт Пуассона, модуль пружності відповідно.</p>		

$$I_3 = I_3(\hat{S}) = \frac{1}{3} I_1(\hat{S}^3). \quad (2.5)$$

$$I_2 = I_2(\hat{S}) = \frac{1}{2} I_1(\hat{S}^2). \quad (2.6)$$

Тоді параметр Лоде-Надаї може бути записаний у вигляді:

$$\alpha = \frac{1}{3} \arcsin \left[ -\frac{\sqrt{6}}{4\sqrt{2}} \frac{I_1(\hat{S}^3)}{I_1(\hat{S}^2)^{3/2}} \right]. \quad (2.7)$$

Асоціативний закон текучості може бути записаний у вигляді:

$$d\gamma^{(p)} = d\lambda \hat{f}_{\hat{S}}. \quad (2.8)$$

де  $\lambda$  – пластичний множник;  $\hat{f}_{\hat{S}}$  – похідна скалярної функції за тензорним аргументом  $\hat{S}$ .

Тоді тензор загальних напружень визначається за формулою:

$$\hat{\sigma} = C_4^{(e,p)} \hat{\gamma}. \quad (2.9)$$

де  $C_4^{(e,p)}$  – тензор пружностей четвертого рангу для матеріалу в пружно-пластичному стані, який виражається через тензор пружностей  $C_4^{(e)}$  для пружного матеріалу через (2.10):

$$C_4^{(e,p)} = C_4^{(e)} - \beta \hat{n} \hat{n}. \quad (2.10)$$

де  $\beta$ ,  $n$  – параметри, які виражаються через похідну скалярної функції по тензорному аргументу:

$$\hat{n} = C_4^{(e)} \hat{f}_{\hat{S}}. \quad (2.11)$$

$$\beta = \left( \hat{n} \hat{f}_{\hat{S}} \right). \quad (2.12)$$

Взявши похідну тензорної функції по тензорному аргументу як похідну від складеної функції, отримаємо вираз:

$$\hat{f}_{\hat{S}} = \xi \hat{S} + \psi \hat{S}^2, \quad (2.13)$$



де  $\hat{S}, \hat{S}^2$  – члени тензорного ряду першого та другого ступеню;  
 $\xi, \psi$  – скалярні величини:

$$\xi = 3 \cdot \left( \cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right) \cdot \left[ \frac{\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi - \sqrt{6} \cdot I_1 \left( \hat{S}^3 \right) \left( \sin \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \alpha \cdot \sin \varphi \right)}{I_1^{3/2} \left( \hat{S}^2 \right) + \sqrt{6} \cdot I_1 \cdot \left( \hat{S}^3 \right)} \right]. \quad (2.14)$$

$$\psi = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \left( \cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right) \cdot I_1 \left( \hat{S}^2 \right) \cdot \left( \sin \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \alpha \cdot \sin \varphi \right)}{I_1^{3/2} \left( \hat{S}^2 \right) + \sqrt{6} \cdot I_1 \cdot \left( \hat{S}^3 \right)}. \quad (2.15)$$

Підставивши співвідношення (2.13) в (2.11) отримаємо співвідношення для визначення параметру  $\hat{n}$ :

$$\hat{n} = 2\mu \left( \xi \hat{S} + \psi \hat{S}^2 \right). \quad (2.16)$$

Аналогічно для параметру  $\beta$  маємо:

$$\beta = 2\mu \left[ \xi^2 I_1 \left( \hat{S} \right) + 2\xi\psi \hat{S} \cdot \hat{S}^2 + \psi^2 I_1 \left( \hat{S}^4 \right) \right]^{-1}. \quad (2.17)$$

Тоді доданок  $\beta \hat{n} \hat{n}$  формули (2.10) набуває вигляду:

$$\beta \hat{n} \hat{n} = \frac{2\mu \left( \xi^2 \hat{S}^2 + 2\xi\psi \hat{S}^3 + \psi^2 \hat{S}^4 \right)}{\xi^2 I_1 \left( \hat{S}^2 \right) + 2\xi\psi \hat{S} \cdot \hat{S}^2 + \psi^2 I_1 \left( \hat{S}^4 \right)}. \quad (2.18)$$

Зв'язок між приростами напружень і приростами скінченних деформацій в стадії активного навантаження запишеться у вигляді:

$$\sigma^{ij} = C_{(e,p)}^{ijkl} \cdot \gamma_{ij}. \quad (2.19)$$

$$C_{(e,p)}^{ijkl} = C_{(e)}^{ijkl} - \beta \cdot n^{ij} \cdot n^{kl}. \quad (2.20)$$

де  $C_{(e)}^{ijkl}, C_{(e,p)}^{ijkl}$  – компоненти тензорів пружностей в пружній та пружно-пластичній стадії розвитку пружно-пластичних деформацій відповідно;

$n^{ij}, n^{kl}$  – компоненти тензора другого рангу, які обумовлені розвитком пластичних деформацій.

Опис приростів тензора напружень у відповідності з теорією пластичної текучості і з використанням прийнятих співвідношень (2.20) забезпечує більш точне врахування пластичних деформацій у трьохвимірному просторі деформованого стану області суцільного середовища.

На відміну від теорій пластичності в реологічних моделях необоротні в'язкі деформації нарастають не миттєво, а протягом достатньо тривалого проміжку часу. Реологічна модель в'язкої текучості будується в просторі напруження – швидкість в'язкої деформації [52, 122].

В залежності від швидкості накопичення деформації, повзучість поділяється на два види:

- затухаюча повзучість;
- незатухаюча повзучість [52].

Процеси затухаючої і незатухаючої повзучості характеризуються миттєвими значеннями деформацій, які зростають за дуже короткий проміжок часу після прикладання навантаження.

Якщо до моменту часу, який умовно приймаємо нескінченним, деформації не зменшилися до нуля, то кажуть про наявність остаточних деформацій. В протилежному випадку вони є пружними. В свою чергу оборотна деформація складається з двох частин:

- та частина деформації, яка знімається після розвантаження миттєво;
- частина оборотної деформації, яка відновлюється за досить тривалий проміжок часу.

Таким чином, повна деформація в деякий момент часу складається з трьох частин:

$$\gamma = \gamma_0^e + \gamma_\infty^e + \gamma^p, \quad (2.21)$$

де  $\gamma_0^e$  – частина деформації, яка знімається після розвантаження миттєво;

$\gamma_\infty^e$  – частина деформації, яка знімається після розвантаження через деякий проміжок часу;

$\gamma^p$  – залишкова (пластична) деформація.

В роботі було прийнято, що:  $\gamma = \gamma_0^e$ . При малому часу впливу більша частина деформації є оборотною,  $\gamma^p \approx 0$ . Залишкові деформації являються наслідком багатократного впливу транспортного навантаження на дорожню конструкцію.

В працях по реології матеріалів шарів дорожнього одягу нежорсткого типу розроблена надзвичайно велика кількість фізичних моделей, які описують властивості різноманітних матеріалів [51, 128, 129]. Фізична модель – це набір послідовно або паралельно з'єднаних тіл Гука, Ньютона чи Сен-Венана [51, 127, 128]. В кожній із цих моделей реальним матеріалам шарів конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу надаються реальні структурні опори. При перевищенні напруженням вертикального стиску чи напруженням зсуву структурного опору змінюється характер деформування моделі. Коли на конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу діє багаторазове короткочасне навантаження, то моделювання реологічних процесів найкраще здійснювати за допомогою чотирьох структурних опорів.

Перший структурний опір являє собою величину, яка називається границя пружності і позначається  $p_{np}$ . відповідно [51, 128, 129]. Границя пружності являє собою величину, яка обмежує значення напружень вертикального стиску, при перевищенні яких матеріал проявляє властивості пружного тіла Гука. (рис. 2.1, а).

Деформація шару дорожнього одягу нежорсткого типу при дії таких напружень визначається за формулою [51]:

$$\varepsilon_{np.} = \frac{\sigma_z}{E_{np.}} \cdot (1 - \mu), \quad (2.22)$$

де  $\sigma_z$  – напруження вертикального стиску на поверхні елементарного об'єму;

$E_{np}$  – модуль миттєвої пружної деформації шару дорожнього одягу нежорсткого типу;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Фізичні моделі, які зображують пружні, в'язко-пружні і в'язко-пружно-пластичні деформації конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, наведені на рис. 2.1, а–в.

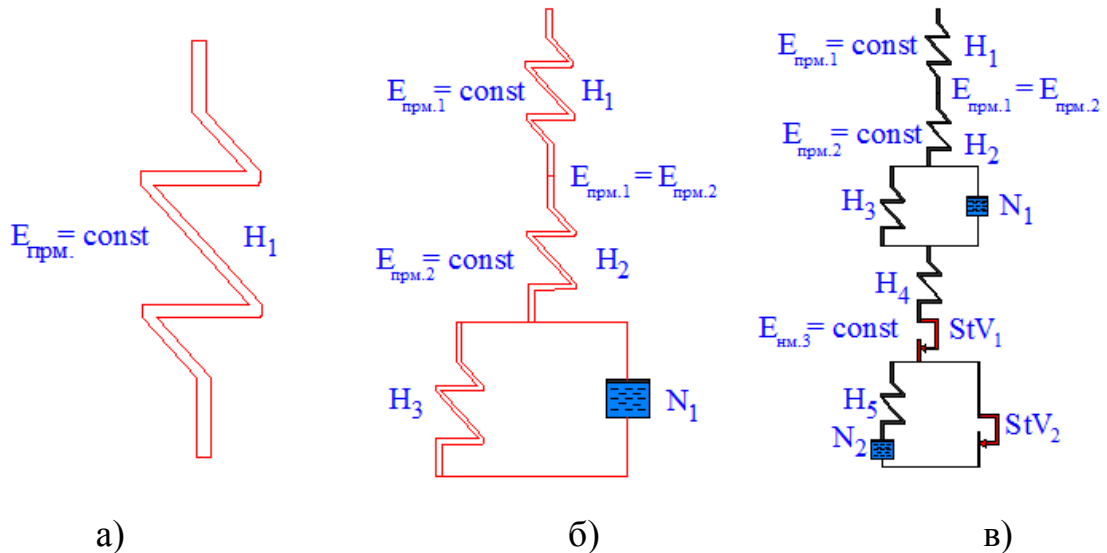


Рис. 2.1 Фізичні моделі процесів, які зображують пружні, пружно-в'язкі та пружно-в'язко-пластичні деформації шару конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу:

а – тіло Гука; б – тіло Максвелла; в – тіло Шведова

Другий структурний опір – границя структурної міцності  $p_{стр.}$ . Границя структурної міцності – це величина, яка обмежує значення напружень вертикального стиску, при яких матеріал шару конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу проявляє властивості пружно-в'язкого тіла Кельвіна. При цьому в матеріалі шару виникають як пружні миттєві, так і пружно-в'язкі деформації [51, 128, 129].

При цьому формула для визначення пружно-в'язкої деформації моделі, яка представлена на рис. 2.1, б при однократному прикладанні навантаження має вигляд [51, 128, 129]:

$$\varepsilon_{прв.} = \frac{p_{np.} \cdot (1 - \mu^2)}{E_{np.}} + \left( \frac{(1 - \mu^2)}{E_{np.}} + \frac{(1 - \mu^2)}{E_{прв.}} \cdot \left[ 1 - \exp \frac{-t_{np.}}{T_3} \right] \right) \cdot (\sigma_z - p_{np.}), \quad (2.23)$$

де  $p_{np.}$  – початкове значення границі пружності, яке відповідає першому прикладанню навантаження, МПа;  $E_{npв.}$  – модуль пружно-в'язкої деформації матеріалу шару конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, МПа;  $t_{np.}$  – час, який дорівнює еквівалентній тривалості дії напружень, які перевищують границю пружності, с;  $T_3$  – час запізнення пружно-в'язкої деформації, с.

Третій структурний опір – це границя лінійності пластичних деформацій. (величина, яка обмежує значення напружень вертикального стиску, при яких шар конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу проявляє властивості фізично лінійного тіла). Фізичною моделлю, яка зображує пружно-в'язко-пластичне деформування матеріалу шару конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, є тіло Шведова [51, 128, 129]. В такій моделі повна деформація в умовах однократного прикладання навантаження становить [128, 129]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{np.} = & \frac{p_{np.} \cdot (1 - \mu^2)}{E_{np.}} + \left( \frac{p_{cmp.} - p_{np.}}{E_{np.}} \cdot \left[ 1 - \exp \frac{-t}{T_3} \right] \right) \cdot (1 - \mu^2) + \\ & + \left( \frac{\sigma_z - p_{cmp.}}{E_{np.}} + \frac{\sigma_z - p_{cmp.}}{E_{npв.}} \cdot \left[ 1 - \exp \frac{-t_{cmp.}}{T_3} \right] \right) \cdot (1 - \mu^2) + \\ & + \left( \frac{\sigma_z - p_{cmp.}}{E_{н.л.м.}} + \frac{(\sigma_z - p_{cmp.}) \cdot (1 - \kappa_{np.})}{E_{\delta}} \cdot \left[ 1 - \exp \frac{-t_{cmp.}}{T_3} \right] \right) \cdot (1 - \mu^2). \end{aligned} \quad (2.24)$$

де  $E_{н.л.м.}$  і  $E_{\delta}$  – модуль пластичної миттєвої і модуль деформації відповідно;  $T_p$  – час релаксації частини напружень, які перевищують границю структурної міцності, с;

$\kappa_{np.}$  – коефіцієнт, який характеризує долю частини напруження, яке перевищує границю структурної міцності матеріалу шару конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу.

Коефіцієнт  $\kappa_{np.}$  визначається за формулою:

$$\kappa_{np.} = E_{\delta} \cdot \left( \frac{1}{E_{np.}} + \frac{1}{E_{npв.}} + \frac{1}{E_{н.л.м.}} \right). \quad (2.25)$$

Велику роль при визначенні НДС нежорстких дорожніх одягів відіграє

така величина як тривалість прикладання навантаження [35, 40, 51, 52]. В багатьох роботах, які були присвячені прогнозуванню величини залишкових деформацій в шарах дорожніх одягів [51–56, 130, 131] , сумарна тривалість транспортного навантаження обчислюється за формулою:

$$T = f \cdot N_1 \cdot \frac{q^{T_{ca}} - 1}{q - 1} \cdot n_p \cdot K_{IV} \cdot t, \quad (2.26)$$

де  $f$  – коефіцієнт, який враховує кількість смуг руху і розподіл по ним інтенсивності;

$N_1$  – інтенсивність руху, яка приведена до розрахункового навантаження в перший рік служби дорожнього одягу, авт./добу;

$q$  – показник зміни інтенсивності руху за рік;

$T_{ca}$  – розрахунковий строк служби дорожнього одягу, роки;

$n_p$  – тривалість розрахункового періоду, доб.;

$K_{IV}$  – коефіцієнт поперечної установки, який враховує неточне потрапляння в слід автомобілів, що послідовно рухаються;

$t$  – тривалість одиничного прикладання навантаження.

Тривалість одиничного прикладання навантаження в основному приймається в межах від 0,1 с до 0,3 с. Однак подібний підхід може призвести до помилок, якщо прогнозувати строк служби конструкцій нежорстких дорожніх одягів .

Російський вчений Казарновський В.Д. відзначає, що тривалість одиничного прикладання навантаження залежить від конкретних експлуатаційних умов і характеристик міцності дорожньої конструкції.

Для визначення тривалості одиничного прикладання навантаження в межах відбитку колеса розрахункового автомобіля для точок, які знаходяться на поверхні покриття, можна використати формулу [35, 60]:

$$t = \frac{D}{\left[ \left( v_p \cdot K_{пу}^3 - t_n \cdot (3,0 + 0,0008 \cdot (v_p \cdot K_{пу}^3)^2) \right) - \Delta V \right] \cdot \frac{K_{cp}}{3,6}}, \quad (2.27)$$

де  $v_p$  – розрахункова швидкість руху, км/год;

$K_{рш}^э$  – значення експлуатаційного коефіцієнта забезпеченості розрахункової швидкості на розглядуваній ділянці дороги;

$t_n$  – гарантійний коефіцієнт довірчої імовірності при 95 % – вий забезпеченості, який дорівнює 1,64;

$\Delta V$  – зниження швидкості через знаходження вантажних автомобілів в транспортному потоці, км/год;

$K_{cp}$  – коефіцієнт переходу від середньої швидкості транспортного потоку до середньої швидкості вантажних автомобілів і дорівнює 0,92.

В методах професора М.Я. Хархута та професора Смирнова О.В. [51] міститься рішення задачі про визначення тривалості напруженого стану, який виникає в дорожньому одязі при проїзді транспортного навантаження. В таблиці 2.2 наведені запропоновані вченими формули, за якими побудовані графіки (рис.2.2).

Таблиця 2.2

Формули розрахунку тривалості напруженого стану дорожньої конструкції

Автор	Формула для розрахунку тривалості напруженого стану
М.Я. Хархута	$t_j = \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^t \sigma(t) dt$
О.В. Смирнов	$t_j = \frac{D_j}{v}$
Позначення: $\sigma_{\max}$ – максимальне значення напруження, яке відповідає моменту проїзду автомобіля над розглядуваним перерізом, МПа; $D_j$ – діаметр кругової площадки завантаження j-го шару, м; $v$ – швидкість горизонтального руху автомобіля, м/с.	

Ще один фактор, який впливає на НДС дорожньої конструкції, є температура та вологість.

З підвищенням температури суттєво знижуються деформаційні характеристики і характеристики міцності шарів із органо-мінеральних сумішей. Підвищена вологість підстиляючих шарів ґрунту знижує

деформаційні характеристики та характеристики міцності, а також суттєво змінює його реологічні та динамічні властивості.

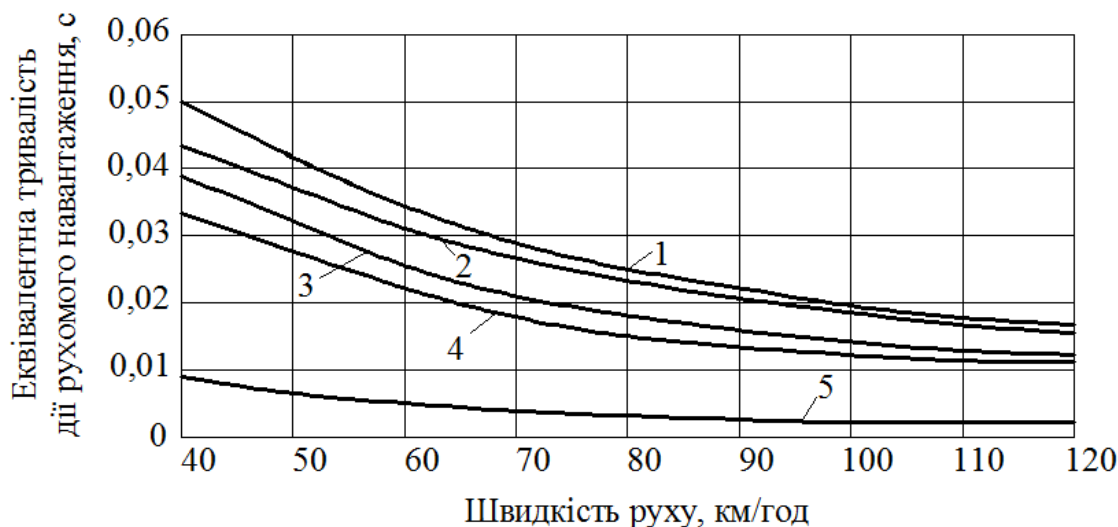


Рис. 2.2 Результати розрахунку еквівалентної тривалості дії транспортного навантаження при  $p = 0,6$  МПа і  $D = 0,37$  м: 1 – за формулою 2.27 при  $p = 0,1 \cdot p$ ; 2 – за формулою 2.27 при  $p = 0,3 \cdot p$ ; 3 – за формулою 2.27 при  $p = 0,5 \cdot p$ ; 4 – за дослідженнями професора О.В. Смирнова; 5 – за дослідженнями професора М.Я. Хархути

На НДС дорожньої конструкції суттєво впливає зчеплення між шарами конструктивних шарів. Із-за недостатньої міцності зчеплення між шарами в реальних умовах експлуатації дороги завжди проходять оборотні відносні зміщення. Тому при динамічних впливах автомобілів такі покриття швидко руйнуються.

В механіці деформованого твердого тіла існує ряд передумов, які допускають застосування наближених геометричних співвідношень: плоский напружений стан, плоска деформація, вісесиметрична деформація. Використання цих співвідношень допомагало вирішити багато задач по розрахунку і конструюванню нежорстких дорожніх одягів. В нормах [1, 106] використовуються рішення вісесиметричної деформації. При цьому при використанні лінійних моделей рішення від будь-якого впливу можна побудувати суперпозицією рішень від окремих складових. Однак вже в



нелінійних розрахунках при врахуванні пластичних деформацій порушується принцип суперпозиції. Тому в нелінійних задачах теорії пружності постановка вісесиметричної деформації не дозволяє врахувати реальну будову конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу і просторовий характер прикладання навантаження. Рішення реальних нестационарних задач механіки дорожніх конструкцій в просторовій постановці практично неможливо традиційними методами. Тому в даній роботі пропонується застосувати чисельний метод, а саме МССЕ. Це дозволить врахувати нелінійну роботу матеріалу і дослідити історію деформування конструкції в будь-який період часу. Основні співвідношення МССЕ наведені в п. 2.3. даної роботи. При цьому припускається пропорційність між позитивним прогином плити і реакцією основи з урахуванням, що коефіцієнт пропорційності є змінною величиною і залежить від координат точки серединної поверхні пластини, в якій визначається прогин і реакція основи:

$$q(x^2, x^3) = -c(x^2, x^3)w, \quad (2.28)$$

де  $c(x^2, x^3)$  – функція коефіцієнта пропорційності (постелі);

$w$  – позитивний прогин в даній точці по нормалі до серединної поверхні пластини в деформованому стані. Математична модель (2.28) добре відтворює властивості ґрунту.

В запропонованій методиці розглядається дослідження НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів при їхній взаємодії з ґрунтовою основою. При цьому в задачі враховується фізична і геометрична нелінійність конструкції.

## **2.2. Основні співвідношення МСЕ при розрахунку і конструюванні нежорстких дорожніх одягів**

В останні роки МСЕ набирає все більшого і більшого поширення при розрахунку і конструюванні нежорстких дорожніх одягів. МСЕ – це один з найбільш ефективних способів побудови наближених рішень задач математичної фізики [71–78, 132–137], який дозволяє природним чином

врахувати багат шаровість конструкції дорожнього одягу, граничні умови, зовнішні статичні та динамічні впливи. Припущення, яке використовується в методі, засноване на представленні суцільного середовища у вигляді сукупності окремих відрізків, які зв'язані між собою скінченною кількістю вузлових зв'язків.

МСЕ дозволяє розглядати області зі складною топологією при різних граничних умовах [52]. Основна ідея МСЕ полягає в переході від нескінченної системи диференціальних рівнянь в часткових похідних до скінченної системи алгебраїчних рівнянь відносно скінченної кількості невідомих. Після заміни вихідної просторової області деякою сіткою з конкретними параметрами апроксимації (описання однією функцією заданого вигляду іншої) кажуть про дискретизацію розрахункової області. МСЕ отримав основний розвиток з минулого століття. При використанні МСЕ необхідно досягти компромісу при дискретизації розрахункової області. Сітка повинна бути достатньо густою для отримання точного рішення. Разом з тим, розміри сітки не повинні перевищувати деякого граничного значення, після якого використання дискретизації стає неможливим через високу розмірність системи. Сітку роблять густішою не для всієї системи, а там, де рішення суттєво залежить від ступеня дискретизації. Зазвичай це зони, де прикладене розподілене навантаження та границі зон з різними фізико-механічними характеристиками (наприклад, границя асфальтобетон – щебінь або ресайклірована органічно-мінеральна суміш – відсів).

Для вирішення задач розрахунку на міцність конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу на основі МСЕ використовується варіаційне рівняння руху і та критерій текучості Мізеса.

Варіаційне рівняння руху в довільний момент часу  $t$  є вихідним співвідношенням при використанні МСЕ [52, 70–78, 132–137] та має вигляд:

$$\int_v (\sigma' + \hat{C} \cdot \gamma) \cdot \delta \gamma dv + \int_v \rho \bar{u} \cdot \delta \bar{u} dv - \int_v \bar{p} \cdot \delta \bar{u} dv - \int_v \bar{q} \cdot \delta \bar{u} ds = 0, \quad (2.29)$$

де  $\sigma'$  – тензор початкових напружень Піола-Кірхгофа;

$\hat{\gamma}$  – тензор приростів кінцевих деформацій Коші-Гріна;

$\vec{u}, \vec{\ddot{u}}$  – вектори приростів переміщень і прискорень;  $\vec{p}, \vec{q}$  – узагальнені вектори об'ємних і поверхневих сил;  $\rho$  – щільність матеріалу суцільного середовища;

$\hat{C}_4^{(e)}$  – тензор пружностей четвертого рангу.

Якщо врахувати дисипативні сили, то рівняння (2.29) зводиться до диференціального рівняння руху скінченно-елементної моделі гнучкої пластинки на пружній основі [78, 134, 135]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{R(u)\} - \{Q(u)\} = \{Q_0(u)\}, \quad (2.30)$$

де  $M$  – матриця мас скінченно-елементної моделі;  $[C]$  – реакція в'язкого демпфірування скінченно-елементної моделі;  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  – вектори приростів переміщень, швидкостей і прискорень скінченно-елементної моделі;  $\{R(u)\}$ ,  $\{Q(u)\}$  – матриці узагальнених реакцій внутрішніх і зовнішніх сил скінченно-елементної моделі;  $\{Q_0(u)\}$  – матриця узагальнених реакцій ґрунтової основи скінченно-елементної моделі.

Для того щоб розв'язати диференціальне рівняння (2.29), необхідно використати метод встановлення, який детально описаний в [133]. Рішення рівняння (2.29) приводить скінченно-елементну модель до нового рівноважного стану, в якому повинні виконуватися умови статичної рівноваги, які зумовлені нелінійними рівняннями [78, 133, 134]:

$$\{R(u)\} - \{Q(u)\} = \{Q_0(u)\}. \quad (2.31)$$

Рівновага розглядається в точці часового простору на  $(n+1)$ -му кроці продовження за параметром збурення, але інерційні сили не враховуються [78, 133]:

$$[C]\{u^{n+1}\} + \{R(u^{n+1})\} + \{Q_0(u^{n+1})\} - \{Q(u^{n+1})\} = 0, \quad (2.32)$$

де  $[C] = c[D]$ ;  $[D] = \text{diag}[K]$ ;  $[K]$  – матриця жорсткості скінченно-елементної моделі;  $c$  – коефіцієнт пропорційності пружної основи (коефіцієнт постелі).

Для того, щоб знайти реактивний тиск пружної основи, необхідно розв'язати однорідне диференціальне рівняння (2.33) в декартовій системі координат:

$$D\nabla^2(\nabla^2 w(x, y)) + p(x, y) = 0, \quad (2.33)$$

де  $\nabla^2 w(x, y)$  – оператор Лапласа;  $\nabla w(x, y)$  – набла-оператор Гамільтона [136];

$\nabla w(x, y)$  – функція прогину точки пластинки, що знаходиться на серединній поверхні;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \text{ – циліндрична жорсткість пластинки [78];}$$

$h$  – товщина пластинки;

$E$  – модуль пружності Юнга матеріалу пластинки;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$p$  – реактивний тиск пружної основи.

В наш час при рішенні задач статки використовуються три основних підходи:

- прямий – використовується при рішенні простих задач;
- варіаційний підхід – заснований на принципі стаціонарності функціонала.

Зазвичай використовуються функціонали Лагранжа, Кастільяно, Хеллінгера-Рейснера, Ху-Васідзу [136].

Основою для варіаційного формулювання є принцип віртуальної роботи, який звучить наступним чином: нехай механічна система, на яку накладено задані геометричні в'язі, знаходиться в стані рівноваги під дією прикладених сил. Тоді сума всіх віртуальних робіт  $\delta W$  зовнішніх і внутрішніх сил, які діють на цю систему на будь-яких нескінченно малих віртуальних переміщеннях, що задовольняють заданим геометричним в'язям, дорівнює нулю:

$$\delta W = 0. \quad (2.34)$$

Варіаційні методи широко застосовуються в теорії малих деформацій. Варіаційні формулювання теорії пружності і пластичності мають цілий ряд пе-

реваг [136]:

- функціонал, що підлягає варіюванню, має певний фізичний сенс і є інваріантний відносно перетворення координат;
- варіаційне формулювання має достатньо багатий математичний апарат, що дає можливість отримати ряд варіаційних принципів з використанням множників Лагранжа;
- коли точне рішення задач теорії пружності і пластичності неможливо знайти, варіаційний метод забезпечує формулювання для наближеного рішення задачі.

Досвід вирішення задач механіки суцільного середовища на основі МССЕ показав, що традиційний спосіб отримання матриць жорсткості на основі процесу Рітца чи Галеркіна може мати погану збіжність тому що прийнятий варіант апроксимації переміщень не дозволяє точно описати зміщення скінченного елемента як жорсткого цілого [78, 133, 134, 138].

Зниження точності результатів рішень МСЕ породжує негативні явища (жорсткі зміщення та фіктивний зсув), причиною яких є те, що існуючими апроксимаціями функції переміщень неможливо описати всі види деформацій, які входять в матриці жорсткості СЕ.

Отже, МСЕ є чи не найбільш ефективним методом, який використовується в інженерних розрахунках, оскільки він дозволяє врахувати багат шаровість дорожньої конструкції, а також наявність включень, які моделюють елементи дорожнього одягу.

### 2.3. Основні співвідношення МСЕ з використанням МССЕ

Суть МССЕ зводиться до відкидання членів розкладання деформацій в степеневий ряд [133, 138]. Розглянемо шестигранний криволінійний елемент, який віднесений до локальних криволінійних координат  $\xi^1, \xi^2, \xi^3$  (рис. 2.3).

Позначимо через  $\vec{r}_i, \vec{r}^i$  – вектори основного і взаємного базису, які визна-

чаються через радіус-вектор суцільного середовища. В точці O маємо:  $\vec{r}_i = \frac{\partial R}{\partial \xi^i}$ .

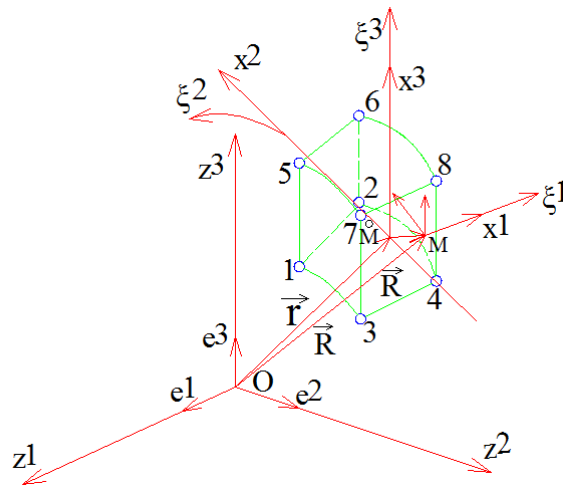


Рис. 2.3 Шестигранний криволінійний скінченний елемент, віднесений до локальних криволінійних координат

Одночасно з криволінійними координатами точкам локальної області  $\vec{r}_{(e)}$  скінченного елемента вводяться прямолінійні координати  $x_{(e)}^1, x_{(e)}^2, x_{(e)}^3$  [78, 133, 134, 138]. Між координатами існує взаємно-однозначна відповідність. Радіус-вектор локальної області визначається відносно початку координат:

$$\vec{r} = x_{(e)}^m \vec{r}_m; \quad x_{(e)}^m = x_{(e)}^m(\xi^1, \xi^2, \xi^3). \quad (2.35)$$

Розкладаємо переміщення в ряд [133, 138, 139]:

$$u_i = w_i^{(0)} + \xi^n w_{i(n)}^{(0)} + \frac{1}{2} \xi^m \xi^n w_{i(mn)}^{(0)} + \dots + \xi^e \dots \xi^m \xi^n w_{i(e...mn)}^{(0)}. \quad (2.36)$$

Представляємо вираз (2.36) в матрично-векторній формі [133, 138, 139]:

$$\{u\} = [\xi]\{w\} + [\xi_{(a)}]\{v\}. \quad (2.37)$$

Вектор переміщень розкладаємо в ряд Маклорена:

$$\vec{u} = \vec{u}_{(0)} + \vec{r}_{(e)} \bullet \nabla \vec{u}|_{(0)} + \frac{1}{2} r_{(e)} r_{(e)} \bullet \bullet \nabla \nabla \vec{u}|_{(0)} + \frac{1}{6} \vec{r} \vec{r} \vec{r} \bullet \bullet \bullet \nabla \nabla \nabla \vec{u}|_{(0)} + \dots \quad (2.38)$$

Для компонент переміщень, віднесених до базису  $i_n$ , маємо [133, 138, 139]:

$$u_i = u_i^{(0)} + x^n \nabla_n u_i|_{(0)} + \frac{1}{2} x^m x^n \nabla_m \nabla_n u_i|_{(0)} + \frac{1}{6} x^e x^m x^n \nabla_e \nabla_m \nabla_n u_i|_{(0)} + \dots; \quad (2.39)$$

Аналогічно для функції деформацій можна записати [133, 138, 139]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{(0)} + r_{(e)} \bullet \nabla \varepsilon|_{(0)} + \frac{1}{2} \bar{r} \bar{r} \bullet \bullet \nabla \nabla \varepsilon|_{(0)} + \frac{1}{6} \bar{r} \bar{r} \bar{r} \bullet \bullet \bullet \nabla \nabla \nabla \varepsilon|_{(0)} + \dots \quad (2.40)$$

Або у матрично-векторній формі [133, 138, 139]:

$$\{\varepsilon\} = [\Phi^{(\varepsilon)}] \{M_{(\varepsilon)}\}, \quad (2.41)$$

де  $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \varepsilon_{22} \varepsilon_{33} \varepsilon_{12} \varepsilon_{13} \varepsilon_{23}\}^T$  – вектор деформацій;  $[\Phi^{(\varepsilon)}]$  – матриця степеневих функцій, які належать до системи функцій форми;  $\{M_{(\varepsilon)}\}^T = [M_{\varepsilon}^0 M_{\varepsilon}^1 M_{\varepsilon}^2 \dots]^T$  – вектор коефіцієнтів ряду (2.41), які одночасно є моментами деформацій відносно системи функцій  $\{\psi\}$ .

На основі геометричного рівняння Коші записуємо залежність між моментами деформацій і коефіцієнтами розкладання в ряд переміщень [133, 138, 139]:

$$\nabla_m \bullet \bullet \bullet \nabla_n \varepsilon_{ij}|_{(0)} = \frac{1}{2} (\nabla_m \bullet \bullet \bullet \nabla_n \nabla_i u_j|_{(0)} + \nabla_m \bullet \bullet \bullet \nabla_n \nabla_j u_i|_{(0)}). \quad (2.42)$$

З урахуванням (2.37) ці співвідношення представляються у векторно-матричному вигляді:

$$\{M_{\varepsilon}\} = \{M_{\varepsilon}^{(w)}\} + \{M_{\varepsilon}^{(a)}\} = [\Lambda] \{w\} + [\Lambda_a] \{v\}, \quad (2.43)$$

де  $\{M_{\varepsilon}^{(w)}\}$  – містить основну частину моментів деформацій, які залежать тільки від базового вектора  $\{w\}$  і визначають порядок апроксимацій деформацій. Друга частина – вектор  $\{M_{\varepsilon}^{(a)}\}$ , який складається із вищих (поправочних) моментів розкладу і включає компоненти вектори  $\{w\}$  і  $\{v\}$ .

Тоді рівняння мінімізації енергії деформації має вигляд:

$$\nabla \dots \nabla \varepsilon|_{(0)} \dots_4 C = 0, (\nabla_m \dots \nabla_n \sigma^{ij}|_{(0)} = C^{ijke} \nabla_m \dots \nabla_n \varepsilon_{ke}|_{(0)} = 0. \quad (2.44)$$

Рівняння (2.44) дозволяють встановити залежність:

$$\{v\} = [R] \{w\}, \quad (2.45)$$

З урахуванням залежності (2.45) вектори переміщень і деформацій визначаються згідно із формулами [133, 138, 139]:

$$\{u\} = ([\xi] + [\xi_a [R]]) \{w\} = [\gamma] \{w\}; \quad (2.46)$$

$$\{u\} = [S]\{w\}; \quad (2.47)$$

$$\{w\} = [S]^{-1}\{u\}; \quad (2.48)$$

$$\{M_\varepsilon\} = ([\Lambda] + [\Lambda_a][R])\{w\} = [B][w]; \quad (2.49)$$

де  $\{u\}$  – вектор вузлових переміщень скінченного елемента.

Матриця жорсткості скінченного елемента відносно моментів деформацій має вигляд [133, 138, 139]:

$$[K_\varepsilon] = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} [\Phi^{(\varepsilon)}]^T [C]_4 [\Phi^{(\varepsilon)}] \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3. \quad (2.50)$$

В останній час ряд вчених відмічають широке застосування МССЕ до вирішення задач механіки руйнування [133, 138, 139].

Розкриття тріщин може здійснюватися трьома шляхами: нормальний відрив (тип I), поперечний зсув (тип II), поздовжній зсув (тип III) [65, 138]. Як наслідок, локальні напруження у вершині тріщини характеризуються коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_I, K_{II}, K_{III}$  відповідно. За допомогою цих коефіцієнтів обчислюються поля напружень і переміщень у вершині тріщини. При зростанні ширини розкриття тріщини енергія деформації визначається за формулами [138]:

$$G_1 = -\frac{\partial W}{\partial F_1}; G_2 = -\frac{\partial W}{\partial F_2}; G_3 = -\frac{\partial W}{\partial F_3}, \quad (2.51)$$

де  $W$  – потенціальна енергія тіла;  $F_1, F_2, F_3$  – поверхні тріщин, які відповідають трьом незалежним типам руйнування.

Використання МССЕ зумовлено тим, що за цією схемою просто і ефективно враховується явище «хибного зсуву», який виникає за рахунок зміщення елементарного об'єму як жорсткого цілого при великих переміщеннях тіла. Варіаційно-різницевий метод дозволяє значно спростити процедуру отримання матриці мас дискретних моделей. Аналіз отриманих співвідношень показав, що розклад векторів переміщень в ряди Маклорена відносно локальних криволінійних і прямолінійних координат при однаковій



кількості утриманих членів мають однаковий порядок апроксимації, причому коефіцієнти ряду (2.39) взаємно однозначно визначаються через коефіцієнти ряду (2.36). Це дає можливість для криволінійних скінченних елементів розглядати переміщення безпосередньо як функції координат  $x^i$  і всі операції по обчисленню матриці жорсткості у відповідності із запропонованою методикою виконувати в прямолінійних координатах, що суттєво спрощує співвідношення.

Для кожного скінченного елемента дискретної моделі у базовій системі координат послідовно обчислюються:

- вузлові компоненти вектора зовнішніх зусиль  $Q_{(n+1)}$ , які залежать від параметра інтенсивності навантаження  $Q_{(n+1)}$  та метрики  $M_{(n)}$ ;
- метричні характеристики скінченного елемента в момент часу  $t_n$ ;
- вузлові компоненти вектора внутрішніх зусиль  $R_{(n+1)}$ , що відповідають накопиченим напруженням;
- компоненти вектора вузлових переміщень  $u_n$ .

Повні напруження та пластичні деформації обчислюються на кроці обчислення вузлових реакцій  $R_{(n+1)}$ . Для кожного скінченного елемента на відрізка часу, що належить до часового інтервалу  $[\Delta t_n, \Delta t_{n+1}]$ , обчислюються:

- тензор швидкості деформацій –  $\hat{\varepsilon}^{(n)} = f\left(\left\{u\right\}^n, \hat{g}^{(n)}\right)$ ;
- приріст тензора напружень –  $\Delta \hat{\sigma}^{(n+1)} = \left(\hat{C} \cdot \hat{\varepsilon}\right) \cdot \Delta t$ ;
- накопичені повні напруження –  $\hat{\sigma}^{(n+1)} = \hat{\sigma}^{(n)} + \Delta \hat{\sigma}^{(n+1)}$ ;
- кулова частина тензора повних напружень –  $\hat{\sigma}_V^{(n+1)} = \frac{1}{3} \hat{\sigma}^{(n+1)} \hat{g}^{(n)}$ ;
- дівіаторна частина тензора напружень (зміна форми без зміни об'єму) –

$$\hat{S}_*^{(n+1)} = \hat{\sigma}_*^{(n+1)} - \hat{\sigma}_V^{(n+1)}.$$

Прирости пластичних деформацій та накопичені пластичні деформації до моменту часу  $\Delta t_n$  визначають за формулами [133, 134]:

$$\Delta \hat{\mathcal{E}}_{(n+1)}^P \Rightarrow \hat{S}_*^{(n+1)} - \hat{S}^{(n+1)}, \quad (2.52)$$

$$\hat{\mathcal{E}}_{(n+1)}^{(p)} \Rightarrow \hat{\mathcal{E}}_{(n)}^{(p)} + \Delta \hat{\mathcal{E}}_{(n+1)}^{(p)}. \quad (2.53)$$

Сума кульової і девіаторної частини тензора повних напружень і дають значення повних напружень [133, 134]:

$$\hat{\sigma}^{(n+1)} = \hat{\sigma}_V^{(n+1)} + \hat{S}^{(n+1)}. \quad (2.54)$$

Повні вузлові прискорення знаходяться шляхом визначення суми внесків прискорень від скінченних елементів, які примикають до деякого вузла. Після цього аналогічна процедура здійснюється по всіх вузлах сіткової області. Потім відбувається перехід до нової метрики, чим і досягається геометрична нелінійність задачі.

#### **2.4. Алгоритм розрахунку та модель загального процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів**

Процес чисельного розв'язання задач нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів – це не що інше, як кероване проходження якогось шляху у просторі станів розрахункових моделей. Цей простір станів відповідає різним етапам моделювання вихідної розрахункової схеми з послідовним включенням механічних моделей до загальної реологічної моделі комбінованого твердого тіла. Реальна робота конструкції дорожнього одягу відповідає послідовному включенню механізмів пружного, в'язкого і пластичного деформування плити. Шукана задача розглядається як еволюційна і реалізується через ітераційний процес рівноважних станів мембранних систем

зі змінними граничними умовами та реологічними властивостями складного деформованого тіла.

Загальна модель еволюційного процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів представляється системою з п'яти об'єктів [140]:

$$[M_0, I_n, P_r, \{\rho\}, \{\xi\}], \quad (2.55)$$

де  $I_n$  – набір даних і відношень, які утворюють вихідну модель процесу;

$M_0$  – множина станів на класі розрахункових моделей і відношень;

$P_r$  – набір даних, які входять до класу вихідної моделі;

$\{\rho\}$  – відображення, яке визначає шлях переходу від стану до стану на множині відношень  $I_n$  у залежності від сформульованих цими відношеннями критеріальних умов (як приклад – критерій текучості Мізеса);

$\{\xi\}$  – відображення, яке визначає шляхи формування вихідної моделі як результату еволюційного процесу розв'язання задачі.

Множина станів  $M_0$ , на яких реалізується задача деформування комбінованої системи, наведена на рис. 2.4.

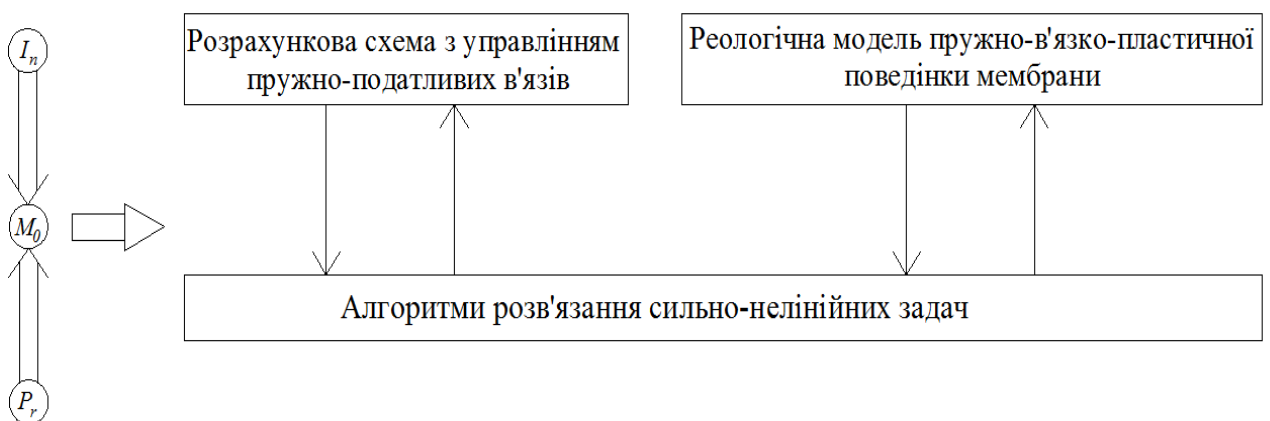


Рис. 2.4 Множина станів, на яких реалізується задача деформування комбінованої системи

У всіх станах розрахункові моделі є скінченно-елементними. Множина станів розрахункових моделей, де реалізується задача нелінійного деформування-

ння конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу, включає в себе:

- стан  $M_1$ , в якому реалізується задача деформування мембранної конструкції (розрахункова схема цієї конструкції трансформована введенням пружно-податливих в'язей) ;
- стан  $M_2$ , в якому реалізується задача нелінійного деформування з використанням методу в'язкої релаксації;
- стан  $M_3$ , де процес розв'язання систем нелінійних рівнянь побудованих на основі методу Ньютона-Канторовича;
- стан  $M_4$ , де реалізується задача при наявності фізичної та геометричної нелінійності з використанням методу динамічної релаксації;
- стан  $M_5$ , де реалізується задача в'язко-пружного деформування плити;
- стан  $M_6$ , який відповідає розв'язанню задачі деформування плити у випадку, коли реалізується загальна реологічна модель в'язко-пружно-пластичного деформування при активному навантаженні.

Основу цих моделей складають алгоритми розв'язання систем нелінійних рівнянь. Структура підмоделей загального процесу наведена на рис. 2.5[140].

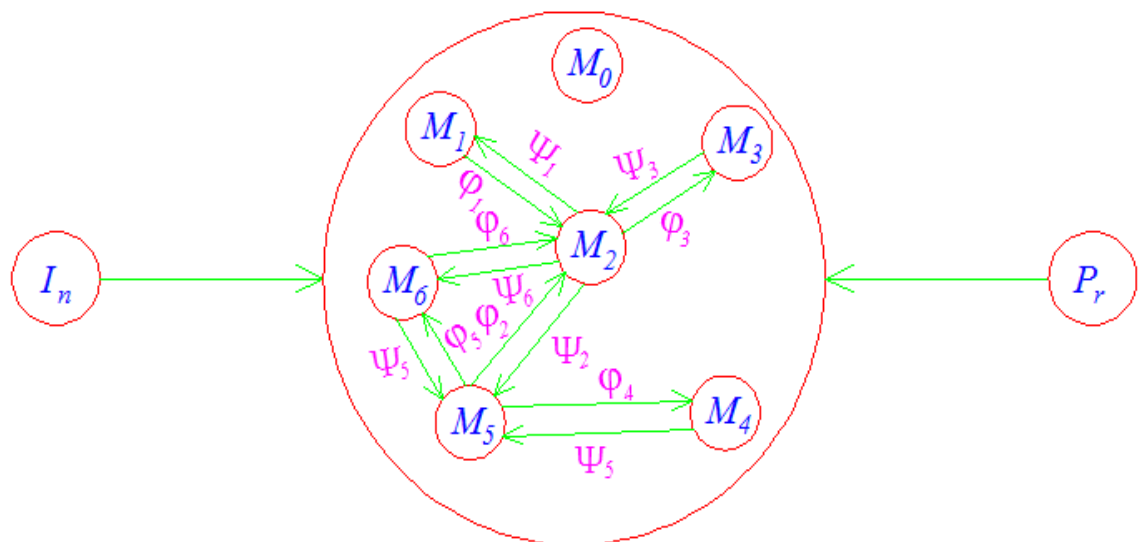


Рис. 2.5 Структура підмоделей загального процесу нелінійного деформування конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу

В якості підмоделей прийняті:

1. розрахункова схема скінченно-елементної моделі мембранної конструкції;
2. реологічна модель конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу;
3. алгоритми розв'язання задач, в яких має місце геометрична і фізична нелінійність.

Три підмоделі в еволюційному процесі деформування гнучкої пластинки і становлять сутність функції переходу зі стану в стан. Коли відбувається проходження стану  $M_1$ , то отримується наближена деформована форма. В стані  $M_2$  підключаються більш ефективний алгоритм. Для того, щоб знизити ступінь поганої обумовленості матриці жорсткості системи лінеаризованих рівнянь рівноваги, в стані  $M_2$  з'являється кульовий тензор переднапружень. Стан  $M_3$  забезпечує розв'язок вихідних систем рівнянь рівноваги.

Проходження станів  $M_1, M_2, M_3$  (коли приймається реологічна модель другої підмоделі) – це включення в роботу лише тіла Гука (рис.2.1, а). Коли відбувається перехід до стану  $M_5$ , в роботу вже включається тіло Максвелла. Перехід до стану  $M_6$  супроводжується включенням в роботу тіла Сен-Венана.

Модель процесу деформування конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу представляється відношенням:

$$M_0 = (\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6\}, \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6\}, \{\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6\}), \quad (2.56)$$

де  $M_i, i=1,6$  – моделі стану системи;

$\varphi_i, i=1,6$  – сукупність прямих відношень переходу від одного типу стану до іншого;

$\psi_i, i=1,6$  – сукупність зворотних відношень переходу від одного типу стану до іншого.

Відношення  $\psi_i, \varphi_i$  забезпечують гнучкість вибору процесу на множині станів розрахункових моделей. У станах  $M_5$  та  $M_6$  конструкція дорожнього одягу після навантаження у пружній стадії є дуже напруженою. Як наслідок –

матриця системи лінеаризованих рівнянь є досить добре обумовленою. Послідовне включення механізмів демпфера зумовлює локальну фізичну нелінійність.

Коли враховується фізична нелінійність, то змінюється тензор пружних констант (тензор пружності четвертого рангу  $\hat{C}_4^e$  замінюється на тензор  $\hat{C}_4^{(e,p)}$ ).

Для кожного скінченного елемента фіксується ознака і визначається тип рівняння стану. Необхідно виконувати ітераційний процес за параметрами поширення зон одноосного напруженого стану і за параметром пластичного протікання. Коли внесок пластичних напружень дуже малий, то ітераційний процес завершується.

Для пружно-пластичної області скінченно-елементної моделі формули алгоритму мають вигляд:

$$\{K_{(e,p)}^{(n)}\} \{\Delta u_{i+1}^{n+1}\} = \{Q(u_i^{n+1})\} - \{F_{(e,p)}(u_i^{n+1})\}; \quad (2.57)$$

$$\{u_{i+1}^{n+1}\} = \{u_i^{n+1}\} + \Delta u_{i+1}^{n+1}, \quad (2.58)$$

де  $n+1$  – крок продовження за параметром збурення;

$i, i+1$  – ітерації за пружною не лінійністю;

$\{K_{(e,p)}^{(n)}\}$  – матриця жорсткості системи лінеаризованих рівнянь;

$\{F_{(e,p)}(u_i^{n+1})\}$  – вектор узагальнених внутрішніх сил скінченно-елементної моделі, одержаної з використанням матриці реакцій скінченного елемента і врахуванням пластичних деформацій.

Критерієм завершення ітераційного процесу за пружною нелінійністю є зниження норми вектора нев'язки:

$$\sqrt{\frac{2}{3} \Delta \varepsilon^{(p)} \bullet \bullet \Delta \varepsilon^{(p)}} \leq \xi. \quad (2.59)$$

Розроблений алгоритм на основі безумовно-стійкої неявної різницевої схеми інтегрування рівнянь руху дискретної моделі поширюється на розв'язування задач чисельного моделювання тонких плит на пружній основі. На практиці ці задачі можуть бути використані для розрахунку конструкцій

дорожніх одягів нежорсткого типу. Для таких покриттів можуть бути використані пластинки, які працюють спільно з ґрунтовою основою. Розрахунок таких покриттів пов'язаний з дослідженням процесу нелінійного деформування тонких плит на пружній основі, яка заміняється набором пружин, що приєднуються за нормаллю у точці поверхні плити.

Реакція основи виникає лише при додатних прогинах і є пропорційною прогину (вінклерівська основа). Коефіцієнт пропорційності «с» є функцією модуля пружності «вінклерівської основи»  $E_0$  і глибини шару основи. Реакція основи є пропорційною прогину згідно із (2.28). Критерієм визначення області деформації пружної основи є величина тиску в ґрунті від впливу штампа. В якості пружини можна прийняти призматичний стержень висотою, яка дорівнює товщині деформованого шару  $h(x^\alpha)$ .

В такому випадку величина коефіцієнта пропорційності реакції основи визначається за формулою:

$$c = - \frac{E_{(0)} F(s)}{h(x^\alpha)}, \quad (2.60)$$

де  $F(s)$  – площа поперечного перерізу призматичного стержня.

Якщо область поширення деформацій (тиску) в ґрунтовій основі має вигляд півкола, то формула для визначення коефіцієнта постелі має вигляд:

$$c = - \frac{2\sqrt{2}}{b} E_{(0)} F(s), \quad (2.61)$$

де  $b$  – половина прогону мембрани.

Якщо врахувати співвідношення (2.61), то реакція основи буде визначатися за формулою:

$$q = - \frac{2\sqrt{2}}{b} E_{(0)} F(s) w, \quad (2.62)$$

де  $w$  – позитивний прогин в даній точці плити.

Реакція основи визначається компонентами у глобальному базисі:

$$Q_{(0)}^i = - \frac{2\sqrt{2}}{b} (E_{(0)} F(s))_{(N)} n_{(N)}^i w, \quad (2.63)$$

де  $n_{(N)}^{i'}$  – компоненти вектора одиничної нормалі до поверхні плити у вузлі N.

Прогин плити за нормаллю через вузлові переміщення визначається як скалярний добуток:

$$w = u_{(M)} \bullet \bar{n}_{(M)} = u_{(M)}^{k'} n_{(M)}^{k'} n_{(N)}^{i'} w. \quad (2.64)$$

Враховуючи залежність (2.64) формула для визначення реакції основи матиме вигляд:

$$Q_{(N)(0)}^{i'} = -\frac{2\sqrt{2}}{b} (E_{(0)} F(s))_{(N)} n_{(N)}^{i'} n_{(M)}^{k'} u_{(M)}^{k'}. \quad (2.65)$$

Рекурентні формули після інтегрування рівняння руху на кроці n+1 для плити на пружній основі мають вигляд:

$$\begin{aligned} & \left[ K_{(NL)}^{ij(n)} + \frac{c_{(N)}^{(n)} n_{(N)}^{(i')} n_{(M)}^{(j')}}{\delta^{ij'} \delta_{(NL)}} \right] \Delta \{ u_{i+1}^{j'(n+1)} \} = \\ & = \{ Q_{(N)}^{i'(n+1)} \} - \{ R_{(N)}^{i'(n+1)} \} - \underline{Q_{(N)(0)}^{i'}}; \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\{ u_{i+1}^{i'(n+1)} \} = \{ u_i^{i'(n+1)} \} + \Delta \{ u_i^{i'(n+1)} \}, \quad (2.67)$$

де  $n_{(N)}^{(i')}, n_{(M)}^{(j')}$  – компоненти вектора одиничної нормалі у вузлах плити;

$c_{(N)}^{(n)}$  – приведений коефіцієнт пропорційності реакції основи, який визначається за формулою (2.61);

$Q_{(N)(0)}^{i'}$  – компоненти реакції основи.

Підкреслені члени у (2.66) зумовлюють вплив основи при взаємодії з плитою.

## 2.5. Висновки за розділом 2

Аналіз вищенаведеного дозволив сформулювати основні висновки за другим розділом дисертаційної роботи.

1. На основі варіаційного рівняння руху в довільний момент часу та розширеного принципу Мізеса з урахуванням критерію Кулона-Мора та параметра Лоде-Надаї побудована математична модель загального процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів при



врахуванні граничного стану рівноваги ґрунтового півпростору, а також фізичної та геометричної нелінійності. При цьому припускається пропорційність між позитивним прогином плити і реакцією основи з урахуванням, що коефіцієнт пропорційності є змінною величиною і залежить від координат точок серединної поверхні.

2. Опис тензора напружень у відповідності з теорією пластичної текучості забезпечує більш точне врахування пластичних деформацій у трьохвимірному просторі деформованого стану суцільного середовища.

3. МСЕ є найбільш ефективним методом, який використовується в інженерних розрахунках, оскільки дозволяє враховувати багат шаровість дорожньої конструкції, а також наявність включень, які моделюють елементи дорожнього одягу. Однак традиційні способи отримання матриць жорсткості на основі процесу Рітца чи Галеркіна часто призводять до спотворених результатів. Щоб ліквідувати цей недолік, запропоновано застосувати МССЕ із використанням ізопараметричного скінченного елемента.

4. Використання МССЕ зумовлено тим, що за цією схемою просто і ефективно враховується явище «хибного зсуву», який виникає за рахунок зміщення елементарного об'єму як жорсткого цілого при великих переміщеннях тіла.

5. Реальна робота конструкції дорожнього одягу відповідає послідовному включенню механізмів пружного, в'язкого і пластичного деформування плити. При цьому задача розглядається як еволюційна і реалізується через ітераційний процес рівноважних станів зі змінними граничними умовами та реологічними властивостями складного деформованого тіла.

## РОЗДІЛ 3

### ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ARDO ТА ТЕСТОВІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКИХ ПЛИТ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

#### 3.1. Загальні принципи обчислювального комплексу

Обчислювальний комплекс, призначений для реалізації процесу дослідження НДС тонких плит на пружній основі має назву SINDOM – система нелінійного деформування оболонок і мембран. Комплекс, як складова частина, входить до підсистеми ПАРУС (підсистема автоматизованих розрахунків унікальних споруд), що створена у рамках існуючої системи математичного забезпечення розрахунків просторових конструкцій “ПРОЧНОСТЬ” [141, 142]. Комплекс SINDOM реалізує модель ітераційного процесу послідовної зміни різних рівноважних станів оболонкових систем.

Система математичного забезпечення “ПРОЧНОСТЬ” була розроблена у 80-х роках минулого століття в проблемній науково-дослідній лабораторії тонкостінних просторових конструкцій Київського інженерно-будівельного інституту і постійно розвивалась у вигляді програмних комплексів ДИСТОС, KOPNOS, LIDYS, SINDOM, KARTPK, ARDO та ін. Останні дві модифікації створені професором кафедри РААШ, д.т.н. Цихановським В.К. та його учнями.

При реалізації обчислювального комплексу у SINDOMі використовуються сервісні програмні модулі та функції бібліотек ПАРУСа, а також програмні модулі генерації вхідного-вихідного рівнів і розв’язування систем лінійних рівнянь за Холецьким з розділу ДИСТОС.

Структура обчислювального комплексу SINDOM наведена у вигляді блок-схеми на рис. 3.1.

Основна мета комплексу SINDOM полягає у розв’язанні задач нелінійного деформування, формозміни і автоматизованого розрахунку на

міцність полегшених оболонкових систем довільної форми. Обчислювальний комплекс SINDOM реалізований у термінах алгоритмічної мови Фортран-77. Структура основного ядра комплексу забезпечує незалежність від машинної реалізації.

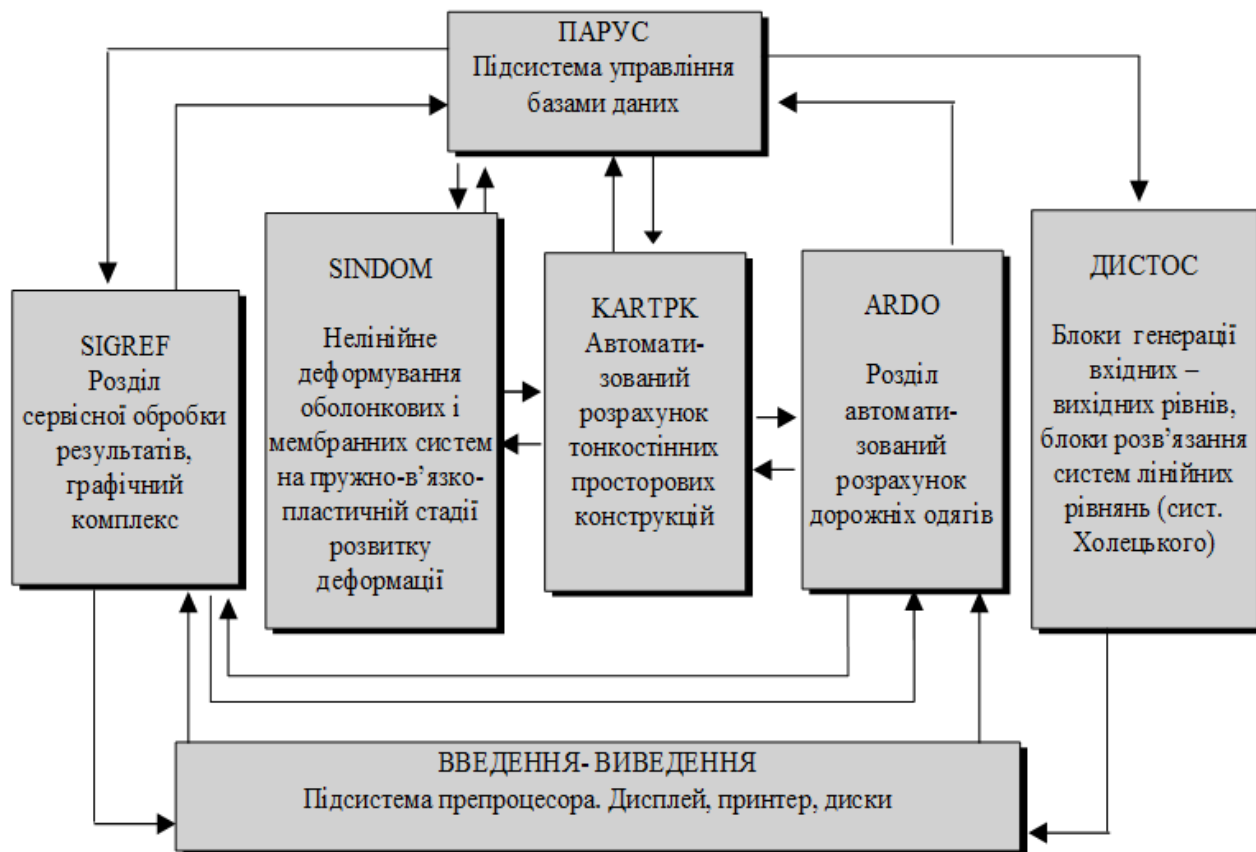


Рис. 3.1 Блок-схема обчислювального комплексу

Розробка комплексу SINDOM базується на сучасних принципах побудови системного математичного забезпечення та ідеях структурного програмування. Універсальність комплексу забезпечується загальним підходом до постановки задач на основі єдиних підходів дискретизації МСЕ у просторі та методу скінченних різниць у часі, а також використанням універсального ексцентричного скінченного елемента для апроксимації тонких оболонок з ребрами.

Система ПАРУС є незамкненою по відношенню до розширення класу задач нелінійного деформування, формозміни та формоутворення, оптимізації форми та структури полегшених механічних систем і комбінованих

оболонкових конструкцій. Життєздатність системи ПАРУС, в тому числі комплексу SINDOM забезпечується модульною структурою, перспективністю MCE і реалізацією на алгоритмічних мовах високого рівня. Комплекс SINDOM може бути використаний як для науково-дослідних, так і для проектно-конструкторських розробок.

Програмний комплекс KARTPK успішно використовується для уточнення розрахунків міцності і стійкості аеродромних покриттів, конструкцій укріплення ґрунтових масивів, а також основ і фундаментів будівель та споруд аеропортів за наявності слабких прошарків ґрунтів у змішаному ґрунтовому півпросторі [78].

З використанням комплексу виконувались розрахунки на міцність і деформативність різних типів жорстких покриттів від впливу надважких повітряних суден при реконструкції ЗПС та проектуванні перону нових терміналів в аеропортах Бориспіль, Донецьк, Львів [78].

За результатами дисертаційної роботи програмний комплекс KARTPK був доповнений розділом ARDO (рис. 3.1), який призначений для автоматизованого розрахунку нелінійних задач (нелінійність відносно узагальнених невідомих проектування та стану -  $\vec{b}$ ,  $\vec{u}$ ) фізичного моделювання та оптимального проектування комбінованих багатошарових систем дорожнього одягу. Максимальна кількість невідомих дискретної моделі розрахункового фрагменту може досягати понад п'ятдесят тисяч. Алгоритм обчислювального програмного комплексу ARDO наведений в додатку А дисертаційної роботи.

Раціональний розподіл оперативної пам'яті EOM забезпечується у доповненому розділі, визначеним відповідним алгоритмом, на наступні етапи організації обчислювального процесу:

#### PREPROCESOR:

- задання та обробка вхідних даних, запакування та розпакування файлів на зовнішніх магнітних носіях (вінчестери, диски);
- контроль і видача вхідної інформації;

- генерація необхідних об'єктних модулів вхідного рівня та створення тимчасової бібліотеки.

#### PROCESSOR:

- упаковка інформації вхідного рівня в робочих масивах з використанням інформації відповідних файлів, заповнених в режимі «preprocessor»;
- упаковка інформації вхідного рівня в робочих масивах з використанням інформації відповідних файлів, заповнених в режимі «preprocessor»;
- реалізація ітераційного процесу за методом сполучених напрямів Пауела;
- формування і розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь відносно змінних стану -  $\bar{u}$  на кожній ітерації процесу за методом Пауелла відносно змінних проектування  $\bar{b}$ ;
- запакування файлів відповідної вихідної інформації.

#### POSTPROCESSOR:

- розпакування файлів, що сформовані у режимі «processor» і заповнення відповідних робочих масивів для вихідної інформації;
- обробка та видача результатів розрахунку на зазначеному кроці продовження у вигляді табличних даних;
- обробка та видача вихідної інформації у вигляді графіків, ізоліній та іншої інформації на зазначеному кроці продовження задачі.

### **3.2 Опис математичних моделей аналітичного розв'язку тестових задач**

Для встановлення ступеня достовірності запропонованої методики визначення НДС тонких плит на ґрунтовій основі, автором розв'язано ряд тестових задач у різних постановках, результати розв'язків яких з достатньою точністю збігалися з відповідними еталонними рішеннями. При цьому використано три моделі:

- модель прямої пропорційності на основі гіпотези Вінклера;
- модель основи з двома пружними характеристиками;

- модель пружного однорідного ізотропного півпростору.

Для кожної моделі існує формула взаємозв'язку позитивного прогину пластинки та вертикального нормального тиску. Для моделі Вінклера зв'язок між прогином пластинки і вертикальним тиском описується формулою (2.28).

Для моделі основи з двома пружними характеристиками формула взаємозв'язку позитивного прогину пластинки та вертикального тиску має вигляд [75]:

$$p(x, y) = k_1 \omega(x, y) - k_2 \nabla^2 \omega(x, y). \quad (3.1)$$

де  $k_1$  і  $k_2$  – перша і друга пружні характеристики основи;  $p(x, y)$  – вертикальний тиск;  $\omega(x, y)$  – позитивний прогин пластинки.

Для моделі пружного півпростору прогин у точці на його поверхні, викликаний дією одиничної вертикальної сили, визначається за формулою [78]:

$$\omega(x, y) = \frac{1 - \nu_o^2}{E_o} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}, \quad (3.2)$$

де  $\xi, \eta$  – координати елементарного реактивного тиску;

$E_o$  – модуль загальної деформації основи;

$\nu_o$  – коефіцієнт Пуассона.

У тестових прикладах використовувались моделі (2.28) та (3.1), які можуть бути описані диференціальним рівнянням виду:

$$\nabla^4 \omega(x, y) + 4\alpha^4 \omega(x, y) = 0. \quad (3.3)$$

де  $\nabla^2 \omega(x, y) = \nabla \cdot \nabla \omega(x, y) = 0$ ;

$\nabla$  – набла-оператор (умовний вектор);

$\alpha$  – параметр, який залежить від циліндричної жорсткості пластинки.

Розв'язок рівняння (3.3) для пластинки нескінченних розмірів призводить до використання функцій Бесселя в циліндричних координатах. Лінійне диференціальне рівняння Бесселя має вигляд:

$$\frac{d^2 \omega}{dz^2} + \frac{1}{z} \left( 1 - \frac{m^2}{z^2} \right) \omega = 0, \quad (3.4)$$

де  $\omega$  – прогин пластинки;  $m$  – порядок функції Бесселя;  $z$  – висота в циліндричних координатах.

Розв'язок диференціального рівняння (3.4) має вигляд:

$$\omega = e^{kz} e^{\pm im\varphi} z_m(k\rho), \quad (3.5)$$

де  $\rho$  – радіус в циліндричних координатах;

$\varphi$  – кут повороту в циліндричних координатах.

### 3.3 Тестова задача розрахунку на міцність необмеженої плити під дією рівномірно розподіленого по колу навантаження

Розв'язок даної задачі має важливе значення при розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу, оскільки в цьому випадку дорожня конструкція розглядається як багат шарова плита на однорідній (неоднорідній) ґрунтовій основі, на яку діє навантаження від колеса автомобіля, що розподіляється по всій площі круга.

Метою розв'язання даної тестової задачі є оцінка точності та дослідження збіжності розрахунків і порівняння отриманих результатів з відомими аналітичними рішеннями.

Для чисельного розрахунку прийнято квадратну плиту скінченних розмірів  $3,75 \times 3,75$  м, товщиною  $h = 0,38$  м.

Відношення товщини до довжини становить:

$$\frac{h}{L} = \frac{0,38}{3,75} \cong \frac{1}{10}. \quad (3.6)$$

Співвідношення (3.6) свідчить про те, що дана конструкція відноситься до класу тонких. Плита опирається на ґрунтову основу з однією пружною характеристикою – коефіцієнтом постелі  $k_0 = 4,13$  кг/см<sup>3</sup>. Навантаження є рівномірно розподіленим по колу з радіусом  $R = 44$  см. Інтенсивність навантаження становить  $q = 45,3$  МПа.

Дана плита наведена на рис. 3.2 та має такі фізико-механічні характери-

стики: модуль пружності –  $E=3326$  МПа; коефіцієнт Пуассона –  $\nu = 0,17$ .

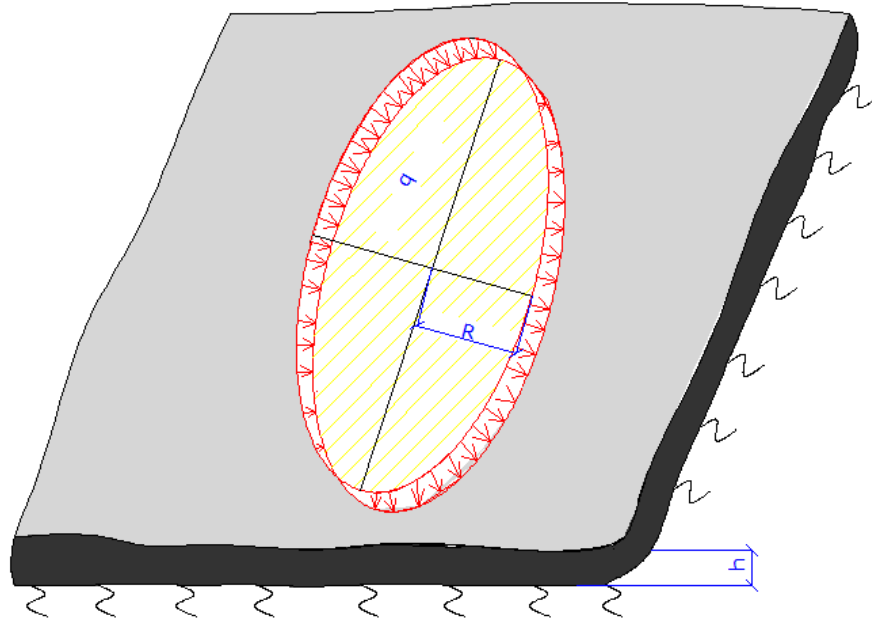


Рис. 3.2 Необмежена плита на пружній основі, навантажена рівномірною розподіленою по колу навантаженням

Розрахунковий відносний прогин покриття від одноколісного еквівалентного навантаження визначається за формулою:

$$\lambda_d = \frac{0,9 \cdot p_a}{E_{ed}}. \quad (3.7)$$

Повне навантаження становить:

$$P = q \cdot 2\pi R = 45,3 \cdot 2\pi \cdot 0,44 = 125,23 \text{ кН}. \quad (3.8)$$

Циліндрична жорсткість і характеристика гнучкості плити визначені за формулами (3.9) і (3.10) відповідно:

$$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} = 11,54 \text{ МН} \cdot \text{м}^2, \quad (3.9)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{k_0}} = 2,29 \text{ м}. \quad (3.10)$$

Значення прогинів при координатах  $\xi \leq \alpha$ , ( $\alpha = \frac{R}{l} = \frac{44}{229} = 0,19$ );

$$\omega = \frac{\pi \cdot q \cdot \alpha \cdot l^3}{2D} [f_0(\alpha)u_0(\xi) - g_0(\alpha)v_0(\xi)], \quad (3.11)$$



де  $\xi = 0; \alpha = 0,19;$

$f_0(\alpha), u_0(\xi), g_0(\alpha), v_0(\xi)$  – значення функцій, які визначаються згідно з [143].

Прогин, визначений аналітичним методом за формулою (3.11), становить  $\omega = 0,07$  см.

При  $\xi \geq \alpha$  ( $\xi = 0,197, \alpha = 0,190$ ),  $\omega = 0,069$  см.

Реактивний тиск основи при  $\xi \leq \alpha$  визначається за формулою (3.12) [143]:

$$P = k_0 \omega = \frac{\pi \cdot q \cdot \alpha}{2 \cdot l} [f_0(\alpha) u_0(\xi) - g_0(\alpha) v_0(\xi)]. \quad (3.12)$$

Реактивний тиск, визначений за аналітичним методом, становить 0,398 МПа. Для розв'язання даної тестової задачі чисельним методом при дії рівномірно розподіленого по кругу навантаження з параметрами, які наведені на рис. 3.2, була розроблена дискретна скінченно-елементна модель пластинки. Враховуючи те, що тут мають місце дві площини симетрії, на рис. 3.3 наведена лише чверть пластинки.

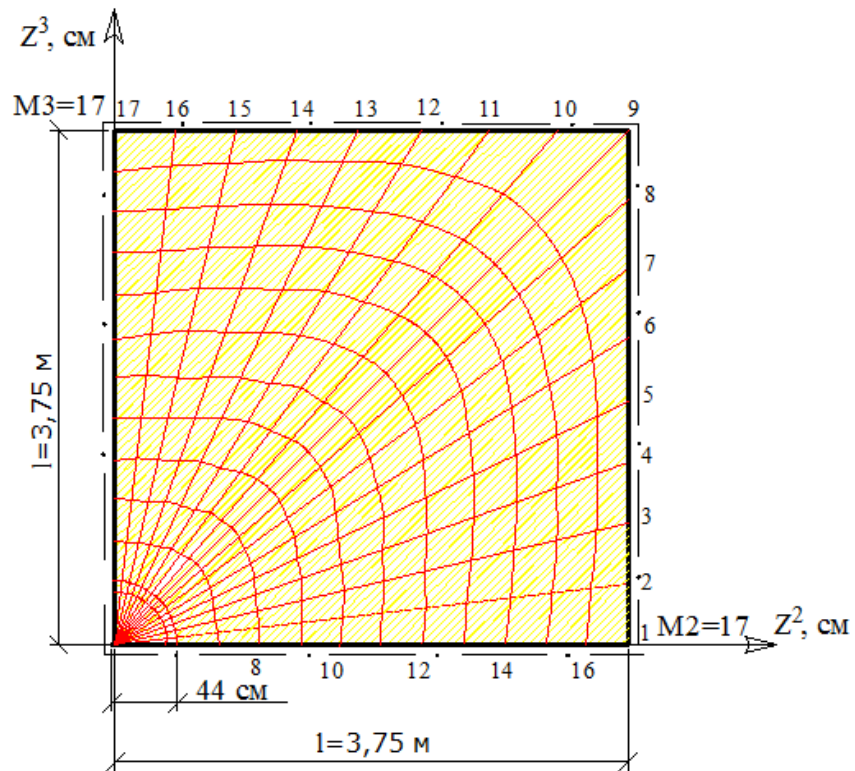


Рис. 3.3 Розрахункова схема скінченно-елементної моделі необмеженої плити на ґрунтовій основі

Граничні умови накладаються на тангенціальні переміщення та кути повороту. Розміри сіткової області складають  $2 \times 17 \times 17$ . Тоді кількість рівнянь рівноваги становить:

$$k = 3 \cdot 2 \cdot 17 \cdot 17 = 1734. \quad (3.13)$$

В центрі розрахункової моделі в нульову точку сходяться всі радіальні координатні лінії – номери вузлів від 1 до 545. При цьому крок шару становить 34. Кількість трикутних скінченних елементів, які сходяться на центральній осі симетрії, становить 16. Решта елементів є чотирикутними.

На приведеній розрахунковій схемі діагональна координатна лінія з сітковими координатами лежить в площині симетрії.

Результати чисельного розрахунку даної тестової задачі наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати чисельного розрахунку необмеженої плити на пружній основі

№ п/п	№ вузла	$u_N^I$ , см	$\sigma_N^{33}$ , кНМ/м	$\sigma_N^{23}$ , кНМ/м	$P$ , МПа
1	7	-0,077	-0,02	0,002	0,217
2	41	-0,076	-0,015	0,002	0,434
3	75	-0,076	-0,013	0,001	0,434
4	109	-0,076	-0,013	0,001	0,434
5	143	-0,076	-0,013	0,001	0,434
6	177	-0,076	-0,012	0,001	0,434
7	211	-0,076	-0,012	0,001	0,434
8	245	-0,076	-0,012	0,002	0,434
9	279	-0,076	-0,012	0,002	0,434

Похибка в обчисленні прогинів і реактивного тиску при порівнянні чисельного і аналітичного результатів складає:

- за прогинами:

$$\Delta u\% = \frac{(0,076 - 0,0702) \cdot 100}{0,0702} = 8,26\% . \quad (3.14)$$

- за реактивним тиском:

$$\Delta P\% = \frac{(0,434 - 0,398) \cdot 100}{0,398} \approx 9\% . \quad (3.15)$$

Чисельні результати за прогинами та реакціями основи відрізняються від аналітичних в більшу сторону на 8,26 та 9 % відповідно. А це свідчить про те, що МСЕ, а саме МССЕ висуває більш жорсткіші вимоги за прогинами та реактивним тиском, ніж аналітичні методи. Результати чисельних та аналітичних розрахунків добре узгоджуються. З цього можна зробити висновок, що алгоритм розрахунку на основі співвідношень МССЕ можна використовувати для визначення НДС дорожніх одягів при взаємодії з ґрунтовою основою.

### **3.4. Плоска задача визначення розподілу напружень між шарами конструкції дорожнього одягу при взаємодії з ґрунтовою основою**

На випадок смугового навантаження на одиничну пластинку досліджено вплив фізичних властивостей різних шарів півпростору на розподіл напружень між ними в умовах відсутності тертя. Аналітичний розв'язок задачі визначення розподілу напружень виконувався А. Лявом, Н. Герсевановим, Н. Форіним [144]. Вони отримали спрощені для практичного розрахунку табульовані формули для визначення зсувних, розпирних і стискаючих напружень. Для порівняння та аналізу результатів, що були отримані при чисельному розрахунку з використанням розробленої методики, була побудована дискретна модель для плоского півпростору з розмірами регулярної сіткової області  $M_2 \times M_3$  (19x23). Значення параметрів розрахункової схеми наведено на рис. 3.4. При цьому ширина смугового навантаження приймалась  $b=2$  м, розмір розрахункової частини півпростору (з урахуванням однієї площини симетрії складає 400x700 см, фізико-механічні характеристики ґрунтового масиву (однорідний, ізотропний): модуль пружності (загальний модуль деформації) –  $E=40$  МПа, коефіцієнт Пуассона (параметр поперечної деформації) –  $\nu=0,3$ . Граничні умови розрахункової схеми наступні: у площині симетрії  $OZ^1Z^3$  в глобальній системі координат накладені в'язі на переміщення і кути повороту у напрямі  $Z^2$ . Такі самі в'язі накладені у площині бічної грані, у нижній площині

півпростору та в усіх вузлах дискретної моделі на переміщення за нормаллю до площини півпростору  $0Z^2Z^3$ .

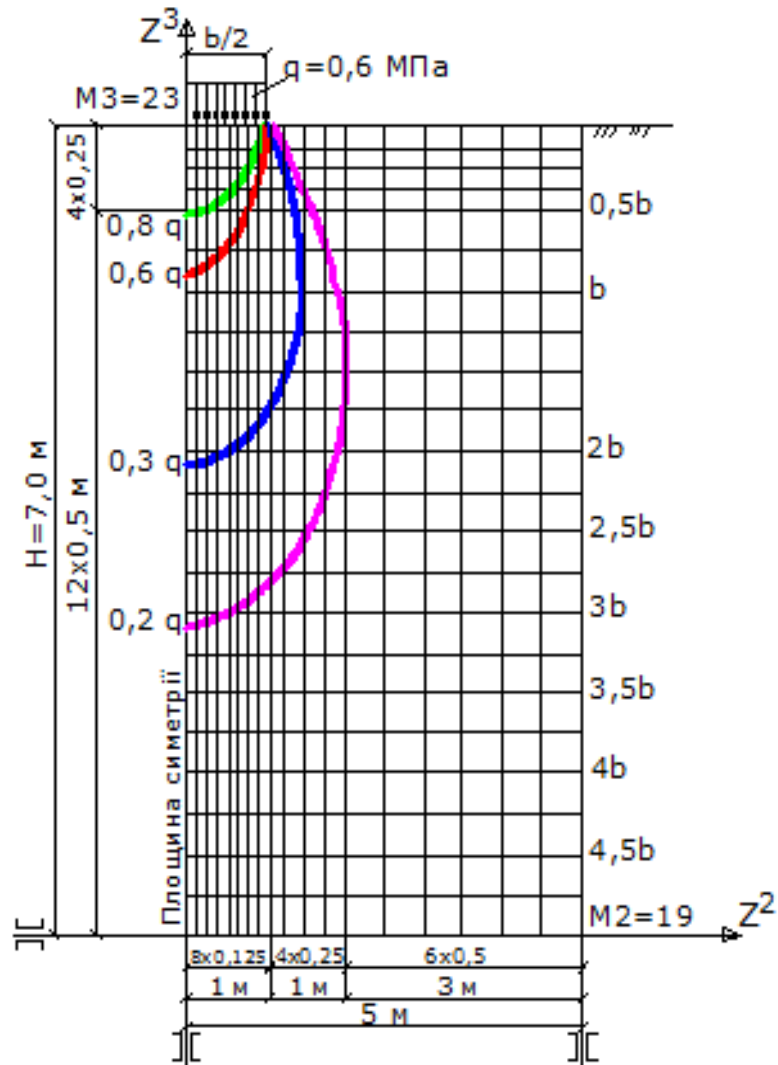


Рис. 3.4 Розрахункова схема півпростору

Для плоскої задачі компоненти тензора напружень  $\sigma_N^{33}, \sigma_N^{22}, \sigma_N^{23}$  не залежать від фізико-механічних характеристик лінійно-деформованого півпростору у вибраних межах навантаження, коли відсутні області пластичної деформації.

Максимальне переміщення у центрі смугового навантаження складає:  $u_{1103}^3 = 0,04$ . Тобто все навантаження передається на скелет ґрунту і визначене напруження за розв'язками теорії пружності буде задавати з необхідною

точністю дійсну величину кінцевих повних напружень у ґрунті від дії зовнішніх сил.

Результатом розв'язання системи рівнянь рівноваги СЕ-моделі розрахункового фрагменту півпростору (система містить  $19 \times 23 \times 6 = 2622$  рівнянь рівноваги без врахування накладених в'язей) є НДС всієї дискретної моделі. Значення максимальних напружень за лінією симетрії наведені у табл. 3.2 і порівнюються із наведеними відповідними величинами аналітичного розв'язку за А. Лявом [144].

На основі скінченно-елементної моделі розглянутої плоскої задачі теорії пружності, що наведена на рис. 3.4, розв'язана класична тестова задача механіки ґрунтів про дослідження впливу фізичних властивостей різних шарів півпростору на розподіл напружень між ними в умовах відсутності тертя. На основі одержаної Маргерром функції параметра  $f$ , що зв'язує пружні сталі суміжних шарів [145], К.Єгоров вивів аналітичне рівняння у формі комплексних змінних для розв'язку задачі про розподіл напружень в пружному півпросторі під дією смугового навантаження. Фізичні властивості півпростору, що складається з двох шарів (верхнього товщиною  $h$  і підстильного нижнього, що має значне поширення на глибину і вбоки), можуть бути охарактеризовані параметром:

$$f = \frac{E_1 (1 - \nu_2^2)}{E_2 (1 - \nu_1^2)}. \quad (3.16)$$

де  $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$  – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона відповідно для кожного із шарів. На основі дискретної моделі було одержано декілька розрахункових схем, що відрізнялися співвідношенням параметрів шарів ( $f = 1, 5, 10, 15$ ).

Значення напружень під центром смугового навантаження отримані для ряду товщин при різних співвідношеннях модулів пружності. Для кожної комбінації цих параметрів побудовані розрахункові схеми задачі та отримані відповідні розв'язки НДС по дослідженню двошарового півпростору.

Результати розв'язання задач за МССЕ порівнюються зі значеннями, отриманими аналітичним способом К. Єгоровим (рис. 3.5) [145].

Таблиця 3.2

Значення нормальних напружень на площині симетрії під центром смугового навантаження

$\frac{H - z^{3'}}{b}$	Номер СЕ	$10^{-1} \sigma_N^{33} / q   10^{-1} \sigma_N^{33}, \text{МПа}$		Похибка, %
		За Лявом	За МССЕ	
0,375	989	0,89/5,34	5,31	0,56
0,625	913	0,752/4,51	4,38	2,88
0,875	837	0,618/3,71	3,58	3,50
1,125	799	0,513/3,08	2,97	3,57
1,375	761	0,438/2,63	2,52	4,18
1,625	723	0,378/2,27	2,18	3,96
2,125	647	0,298/1,79	1,76	1,68
3,125	495	0,205/1,23	1,25	-1,63
4,125	313	0,167/1,0	1,11	-11,0
5,125	191	0,125/0,75	0,95	-26,666

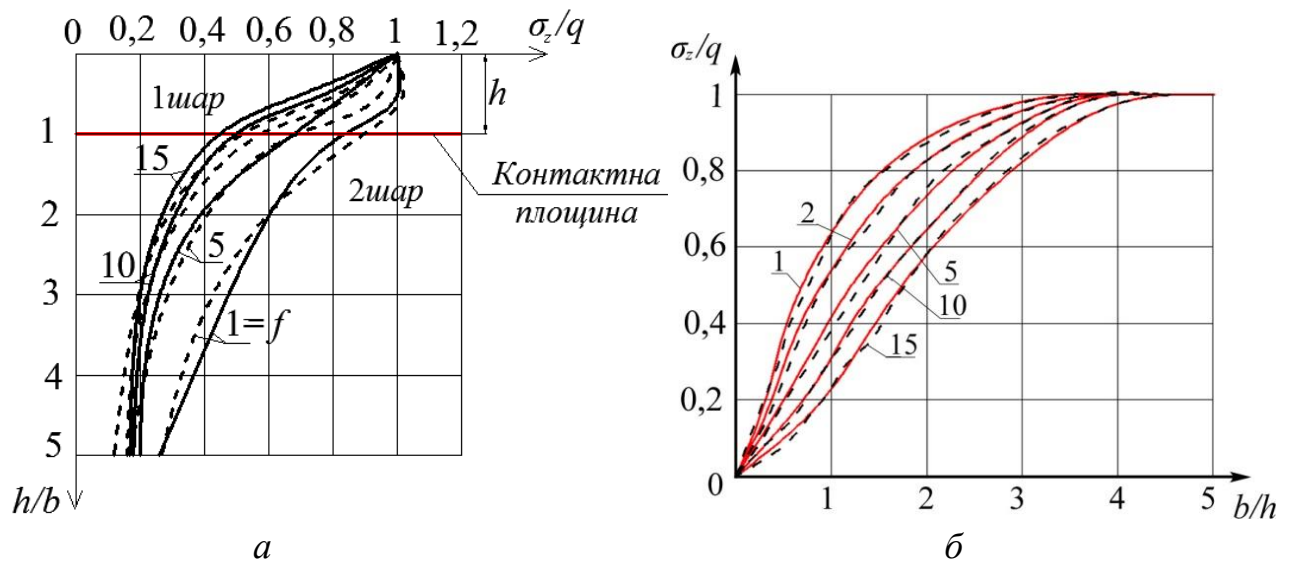


Рис. 3.5 Розподіл напружень у двошаровій основі на межі їхнього контакту: *a* – зміна напружень по глибині; *b* – розподіл напружень по контактній площині (суцільна лінія – розрахунки за МССЕ; штрихова – за Єгоровим [142])

За результатами отриманих числових розв'язків побудовані графіки розподілу напружень у двошаровій основі на межі їх контакту (рис.3.5), звідки видно, що числові і аналітичні розв'язки добре узгоджуються.

### 3.5 Згин рівномірно навантаженої прямокутної пластинки з вільним опиранням по краю

Розглянемо задачу про згин довгої прямокутної пластинки, аналітичний розв'язок якої представлено С.П. Тимошенко в [146]. Співвідношення сторін при цьому становить:  $b/a > 3$ . Поперечне навантаження не змінюється за довжиною. У міру того, як співвідношення  $b/a$  збільшується, максимальні прогини і моменти наближаються до значень, які були обчислені для рівномірно навантаженої пластини, зігнутої по циліндричній поверхні при накладенні умови  $b/a = \infty$ . Для  $b/a = 3$  різниця між прогинами для пластинки складає близько 6,5%, а при  $b/a = 5$  ця різниця менше ніж 0,5%. З цього порівняння можна зробити висновки, що при  $b/a > 3$  обчислення НДС для пластини можуть бути замінені без суттєвої похибки розрахунками для смуги.

Зігнуту поверхню ділянки пластинки можна рахувати циліндричною, з віссю паралельно довжині пластинки.

В цьому випадку дослідження НДС достатньо обмежити дослідженням елементарної смуги, яка вирізана з пластинки двома площинами, відстань між якими дорівнює одиниці довжини (наприклад 1 см). Елементарна смуга знаходиться в умовах рівномірно навантаженого стрижня під дією осьової сили (рис. 3.6).

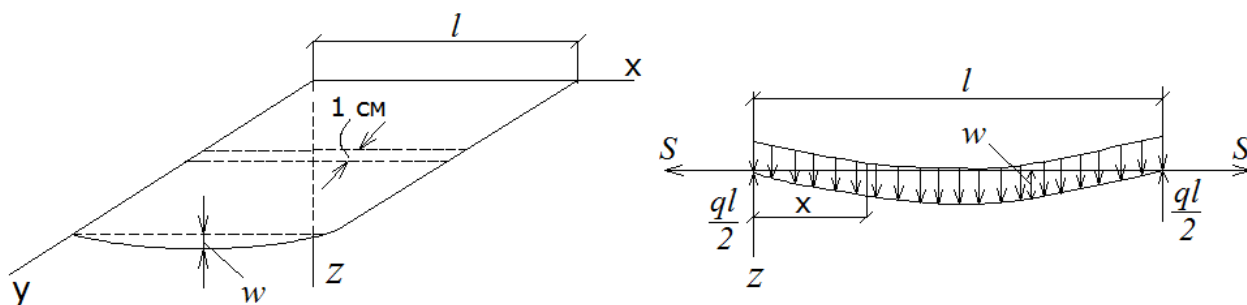


Рис. 3.6 Схема навантаження при циліндричному згині пластинки

Щоб отримати рівняння прогину елементарної смужки, потрібно обрати пластинку постійної товщини  $h$  і позначити ширину пластинки через  $l_0$ . Тоді

справедливо розглядати смужку як стрижень прямокутного перерізу прогоном  $l$  та товщиною  $h$ .

При обчисленні НДС передбачається, що поперечні перерізи стрижня при згині залишаються плоскими і мають місце лише повороти відносно нейтральних осей.

Кривизна зігнутої осі дорівнює  $\frac{d^2\omega}{dx^2}$ , де  $\omega$  – прогин стрижня в напрямі  $z$ .

Рівняння кривої прогинів представлено у вигляді:

$$D \frac{d^2\omega}{dx^2} = -M, \quad (3.17)$$

де  $D$  – жорсткість пластинки при згині.

Якщо інтенсивність рівномірного навантаження позначити через  $q$ , то  $M = \frac{ql}{2}x - \frac{qx^2}{2} - S\omega$ . Таким чином, диференціальне рівняння згину елементарної смужки приймає вигляд:

$$-\frac{ql}{2}x + \frac{qx^2}{2} = \frac{d^2\omega}{dx^2} - S\omega. \quad (3.18)$$

Вводимо позначення  $\frac{S}{D^4}l^2 = u^2$ . Тоді загальний розв'язок рівняння

представляється у вигляді:

$$\omega = C_1 sh \frac{2ux}{l} + C_2 ch \frac{2ux}{l} + \frac{ql^3 x}{8u^2 D} - \frac{ql^2 x^2}{8u^2 D} - \frac{ql^4}{16u^4 D}, \quad (3.19)$$

де постійні інтегрування  $C_1, C_2$  визначаються з граничних умов:  $\omega = 0$  при  $x = 0$  та  $x = l$ :

$$C_1 = \frac{ql^4}{16u^4 D} \cdot \frac{1 - ch 2u}{sh 2u}; \quad C_2 = \frac{ql^4}{16u^4 D}. \quad (3.20)$$

Остаточно отримаємо вираз для прогинів прямокутної пластинки:

$$\omega = \frac{ql^4}{16u^4 D} \left[ \frac{chu \left(1 - \frac{2x}{l}\right)}{chu} - 1 \right] + \frac{ql^3 x}{8u^2 D} (l - x). \quad (3.21)$$



Повне напруження в поперечному перерізі смужки визначається сумою напруження від згину, що пропорційне згинаючому моменту та напруження розтягу, величина якого залишається постійною по довжині смужки:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2; \quad (3.22)$$

$$\sigma_1 = \frac{S}{h} = \frac{4u^2 D}{hl^2} = \frac{Eu^2}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{l}\right)^2; \quad (3.23)$$

$$\sigma_2 = \frac{6}{h^2} M_{\max} = \frac{3}{4} q \left(\frac{l}{h}\right)^2 \psi_0. \quad (3.24)$$

Максимального значення напруження набувають посередині смужки, де згильний момент приймає найбільше значення:

$$M_{\max|x=l/2} = \frac{ql^2}{8} \psi_0(u), \quad \psi_0 = \frac{2(1-\operatorname{sech}u)}{u^2}. \quad (3.25)$$

Значення функцій  $u, \psi_0$  в залежності від матеріалу пластинки, відношення  $\frac{h}{l}$  та навантаження приведені в [147].

Максимальний прогин при  $x=l/2$  дорівнює:

$$w_{\max} = \frac{5ql^4}{384D} f_0(u), \quad (3.26)$$

де  $f_0 = \frac{\operatorname{sech}u - 1 + \frac{u^2}{2}}{5u^4}$  – враховує ефект розтягуючих реакцій, який швидко зменшується зі збільшенням параметру  $u$ .

Параметр розтягу  $u$  залежить від матеріалу пластинки, інтенсивності навантаження та відношення  $\frac{l}{h}$ . Виходячи з рівнянь (3.23), (3.24) та (3.25), бачимо, що напруження  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  також є функціями  $u, q$  та  $\frac{l}{h}$ , але при наявності зусиль розтягу, що збільшуються при зростанні навантаження.

Чисельний розрахунок виконано для прикладу, наведеного в [147], на основі співвідношень МССЕ з використанням просторового оболонкового

скінченного елемента. Розраховується одинична смужка довжиною  $l = 130$  см, товщиною  $h = 1,3$  см, навантаження – рівномірно розподілене  $q = 14$  Н/см<sup>2</sup>,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, відношення  $l/h = 100$  (рис. 3.7).

Параметри регулярної топологічної структури: кількість вузлів HMS = 212, кількість скінченних елементів – 52, число вузлів по M1 = 2, число вузлів по M2 = 2, число вузлів по M3 = 53.

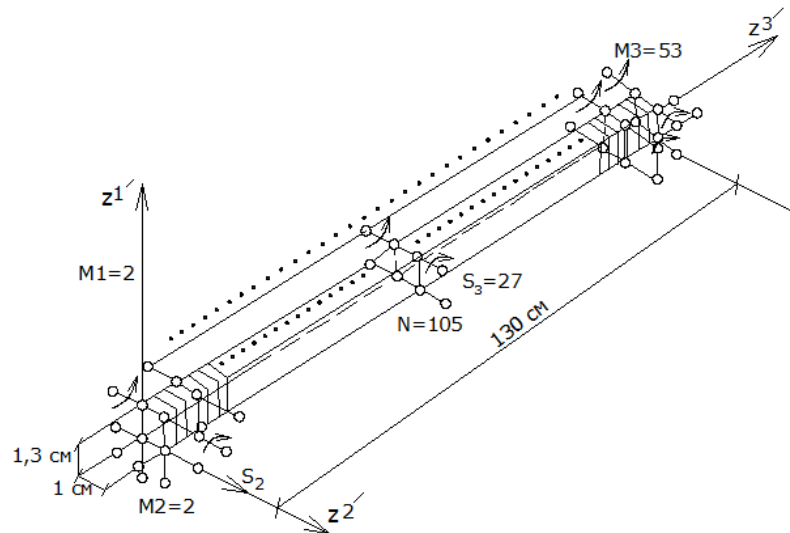


Рис. 3.7 Розрахункова схема до задачі циліндричного згину пластинки

На рис. 3.8 представлені графіки залежності напружень від параметру навантаження  $q$  для прикладу, що розглядається.

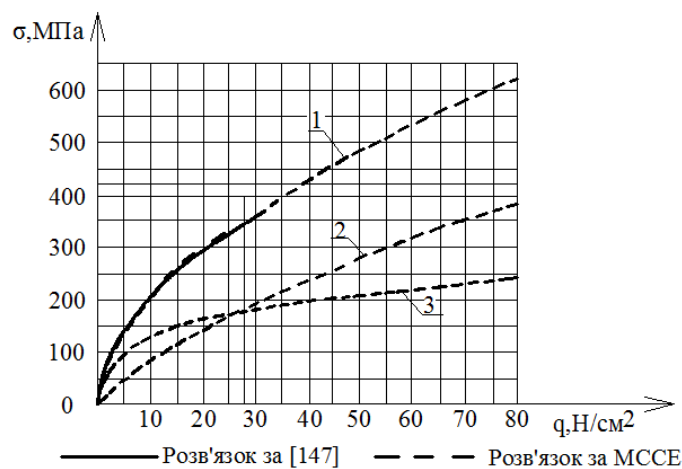


Рис. 3.8 Графіки залежності напружень від параметру навантаження пластинки з вільним опиранням по краю при відношенні  $l/h = 100$  :

$$1 - \sigma_1(q) + \sigma_2(q); \quad 2 - \sigma_1(q); \quad 3 - \sigma_2(q).$$

В таблиці 3.3 наведені результати чисельного розрахунку, які добре узгоджуються з аналітичним розв'язком.

Таблиця 3.3

Порівняння результатів чисельного розрахунку з аналітичним розв'язком

Основні параметри НДС при згині нескінченно довгої пластинки	Результати аналітичного розв'язку, отримані Тимошенко С.П.	Результати чисельного розрахунку на основі співвідношень МССЕ	Похибка чисельних результатів, %
Максимальне переміщення, $w_{\max}$ , см	1,787	$ u_{105}^3  = 1,7827$	0,24
Мембранні напруження, $\sigma_1$ , МПа	110,80	110,70	0,1
Згинальні напруження, $\sigma_2$ , МПа	139,50	139,30	0,14

Чисельні результати представлені в таблиці 3.4 (переміщення позначені  $u^i, u^3 \equiv \omega$ ).

Таблиця 3.4

Переміщення та напруження вузла в середньому перерізі пластинки  $u_{105}^3$

Рівномірно-розподілене навантаження $q \cdot 10^{-1}$ , Н/см <sup>2</sup>	Переміщення вузла в середньому перерізі $u_{105}^3$ , см	Максимальне напруження $\sigma_{105}^{\max} \cdot 10^{-1}$ , МПа	Мембранні напруження, $\sigma_{105}^1 \cdot 10^{-1}$ , МПа	Згинальні напруження, $\sigma_{105}^2 \cdot 10^{-1}$ , МПа
0,5	-1,203	1480	498,5	981,5
1,0	-1,783	2500	1107	1393
2,5	-2,193	3370	1686	1684
4,0	-2,580	4300	2346	1954
5,0	-2,796	4870	2761	2109
8,0	-3,278	6250	3811	2430

За результатами розв'язання тестової задачі можна зробити наступні висновки:

- для даного прикладу крива залежності  $\sigma_{\max}(q)$ , що наведена в [147] та крива, побудована на основі чисельного розв'язку, співпадають;

- максимальне переміщення стрічки при чисельному розрахунку в середньому перерізі при  $q = 80 \text{ Н/см}^2$  дорівнює  $3,28 \text{ см}$ , що обумовлює похибку в  $0,4\%$  порівняно з результатом, отриманим за формулою (3.21).

Також досліджувалась збіжність схеми МСЕ при зменшенні кількості вузлів за довжиною розрахункової моделі, тобто чисельні дослідження проводились для  $M3 = 3, 5, 11, 21, 31, 41, 51$  та  $53$ .

Чисельні результати для розрахункового навантаження  $q = 240 \text{ Н/см}^2$  зведені до таблиці 3.5. Графік збіжності за переміщенням  $\Delta u_{\max}^{3'}$  для навантаження  $q = 240/q = 24,6 \text{ Н/см}^2$  представлено на рис. 3.9.

Таблиця 3.5

Переміщення та напруження вузла в середньому перерізі пластинки при варіюванні кількості вузлів за довжиною розрахункової моделі

Розміри сіткової області / номер вузла в середньому перерізі	Число СЕ, $N_e$	Переміщення в середньому перерізі $u^{3'}$ , см $q = 240 / q = 24,6 \text{ Н/см}^2$	Мембранні напруження, $\sigma^1$ , МПа	Згинальні напруження, $\sigma^2$ , МПа
2x2x3/5	2	-5,1683/-2,2949	7296,41	3711,21
2x2x5/9	4	-4,8745/-2,2316	7890,81	3694,41
2x2x11/21	10	-4,7649/-2,1889	8043,71	3481,81
2x2x21/41	20	-4,7523/-2,1832	8064,41	3472,21
2x2x31/61	30	-4,75/-2,1822	8068,21	3470,41
2x2x41/81	40	-4,7491/-2,1818	8069,51	3469,81
2x2x51/101	50	-4,7488/-2,1816	8070,11	3469,51
2x2x53/105	52	-4,7487/-2,1816	8070,21	3469,51

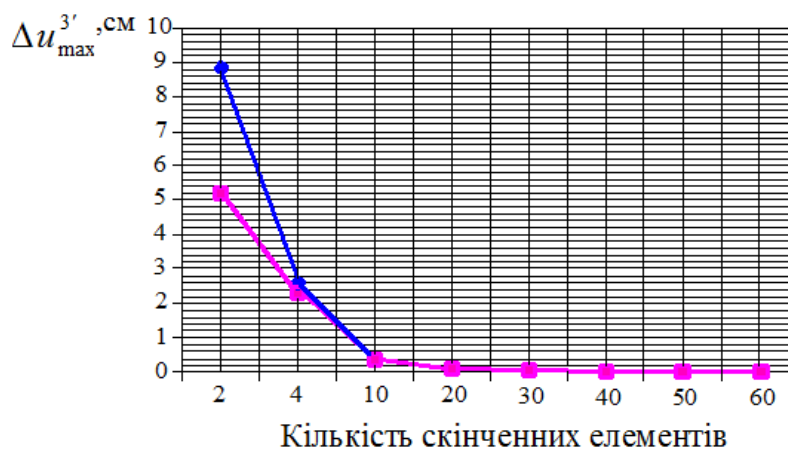


Рис. 3.9. Графік збіжності по переміщенню  $\Delta u_{\max}^{3'}$  (у відсотковому співвідношенні)

Виходячи з кривих збіжності по переміщенню  $\Delta u_{\max}^{3'}$  видно, що при розмірах сіткової області  $2 \times 2 \times 11$  (відповідає системі 132 нелінійних рівнянь) спостерігається достатнє узгодження в межах 0,4% з результатами аналітичного розв'язку.

### 3.6 Висновки за розділом 3

1. Запропоновані загальні принципи обчислювального комплексу для реалізації процесу автоматизованого розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу.

2. Програмний комплекс автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій доповнено розділом ARDO, призначеним для розв'язання нелінійних задач чисельного моделювання багат шарового дорожнього одягу.

3. Описано математичні моделі розв'язку тестових задач, що побудовані на основі технічної теорії згину тонких плит на пружній основі. Приведено результати та порівняльний аналіз деяких прикладів розрахунку тонких плит на пружній основі.

4. Розв'язано контрольну-тестову задачу розрахунку на міцність необмеженої плити під дією рівномірно розподіленого по кругу навантаження. Чисельні результати по прогинах та реакціях основи відрізняються від аналітичних в більшу сторону на 8,26 та 9 % відповідно.

5. Запропоновано методика чисельного дослідження НДС однорідного ізотропного пружного півпростору на основі співвідношень МССЕ, яка може бути використана при розрахунках на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу. Отримані числові результати розв'язків НДС порівнюються з наведеними аналітичними розв'язками класичної тестової задачі механіки ґрунтів про дослідження впливу фізичних властивостей різних шарів півпростору на розподіл напружень між ними. Ці результати добре узгоджуються.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ТА ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО ДОСЛІДЖЕННЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

#### 4.1 Результати аналітичних розрахунків нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

Автомобільна дорога Київ-Ковель належить до III-ї технічної категорії. Згідно з [148] інтенсивність руху транспортних засобів на даній ділянці становить близько 3000 автомобілів за добу. З них:

- 28 % – легкові автомобілі;
- 19 % – легкі вантажні автомобілі;
- 17 % – середні вантажні автомобілі;
- 15 % – важкі вантажні автомобілі;
- 7 % – автобуси;
- 14 % - автопоїзди.

При обліку інтенсивності і складу руху транспортних засобів встановлено, що серед 14 % автопоїздів найбільш часто зустрічаються такі типи:

- автопоїзд у складі тягача DAF-FT XF95 та напівпричепа Kögel – GN-24 (58 %);
- автопоїзд Mercedes-Benz + напівпричеп Кайзер (41 %);
- автопоїзд МЗКТ-742952+ МЗКТ-93783 (1 %).

Перед відновленням дорожнього одягу нежорсткого типу за технологією холодного ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель здійснювався первинний та детальний візуальний контроль. При первинному візуальному контролі реєструються типи ушкоджень дорожнього одягу та їх

розташування. Існуючі деформації та дефекти на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) представлені на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Існуючі деформації та дефекти на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель км 297+700 – км 302+400 (2007 рік)

В результаті візуальної оцінки виявлені такі види деформацій існуючого дорожнього одягу:

- колійність до 5см;
- сітка тріщин по колії (рис.4.1);
- поперечні температурні тріщини.

Також перед виконанням ремонтних робіт з використанням технології холодного ресайклінгу проводилась детальна інструментальна оцінка дорожнього одягу. При цьому проводилось закладання шурфів глибиною до 1,0 м і зразки матеріалу передавались в лабораторію для визначення фізико-механічних характеристик.

Згідно з [148] на ділянці км 297+700 – км 302+400 рекомендовано фрезерувати 5 см асфальтобетонного покриття та залишати для повторного використання в органо-мінеральній суміші, яка влаштовується за технологією холодного ресайклінгу. Технологічним регламентом регламентом [148] на проведення ремонту дорожнього одягу передбачено також здійснювати регенерацію основи на товщину 21 см. Конструкція дорожнього одягу з шаром ресайклінгу наведена в таблиці 4.1.

Слід зазначити, що ремонт даної ділянки дороги був виконаний в 2007 році. Холодний ресайклінг виконувався з використанням комбінованого в'язучого:

- цемент, % - 3;
- бітумна емульсія, % - 1,5.

Таблиця 4.1

Конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

Номер шару	Найменування матеріалу шару	Товщина шару, см
1	Щільний дрібнозернистий гарячий асфальтобетон на бітумному в'язучому	5
2	Щільний крупнозернистий гарячий асфальтобетон на бітумі марки (1) БНД 60/90	6
3	Ресайклірована органо-мінеральна суміш	21-23
4	Щебінь марок 800-1400	5
5	Відсів	20
6	Ґрунт робочого шару – суглинок легкий пілуватий, (J=7-12)2-5мм.<40%	-

Однак вже на початку 2016 року на даній ділянці дороги спостерігались різні деформації у вигляді колій, мікротріщин та напливів. В 2017 році запланований поточний середній ремонт. Тому перед вченими-дорожниками та інженерами постають такі питання:

- чи правильно була призначена товщина шару ресайклінгу?
- чи витримає дана конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу всі навантаження від автотранспортних засобів і впливи від природно-кліматичних факторів?

Дати відповідь на ці питання практично неможливо без порівняльної оцінки НДС відновленої дорожньої конструкції за аналітичними та чисельними методами.

Аналітичні розрахунки для даної конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу виконувались у програмному комплексі «CREDO РАДОН».



Розрахункові характеристики шарів конструкції дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400), наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

## Дані про шари конструкції дорожнього одягу та їх характеристики

№	Назва шару матеріалу	Товщина шару, см	Модуль пружн. для розрах. E, МПа	Модуль пружності на зсув E <sub>зс.</sub> , МПа	Модуль пружності на розтяг E <sub>р.</sub> , МПа	Кут внутрішнього тертя φ, град	Питома зчеплення с, МПа
1	Щільний гарячий асфальтобетон на бітумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	5	3200	1800	4500	-	-
2	Щільний крупнозернистий гарячий асфальтобетон на бітумі марки (І) БНД 60/90	6	3200	1800	4500	-	-
3	Ресайклірована органо-мінеральна суміш	21-23	800	-	-	-	-
4	Щебінь	0-8	350	-	-	-	-
5	Відсів	20	130	-	-	30,55	0,01
6	Суглинок легкий пілуватий, (J=7-12) 2-5мм. <40%	-	50	-	-	6,67	0,02

При виконанні розрахунку змінювалась кожен раз товщина шару ресайклінгу від 21 до 26 см. Обчислення виконувалися на такі значення осьового навантаження від автотранспортних засобів: Q=100 кН; Q=110 кН; Q=115 кН; Q=130 кН. Коефіцієнт Пуассона пакету асфальтобетонних шарів приймався рівним 0,3. Результати розрахунку відновленого дорожнього одягу наведені в таблиці 4.3 [149 – 151].

За результатами обчислень, які наведені в таблиці 4.3, було побудовано графіки залежностей: загального модуля пружності E на поверхні покриття від товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші h (рис. 4.2);

розрахункового пружного прогину  $\omega$  від товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші  $h$  (рис. 4.3); активного напруження зсуву в ґрунті земляного полотна  $\tau$  від товщини шару ресайклінгу  $h$  (рис. 4.4); розрахункового напруження розтягу при згині  $G$  від товщини шару ресайклінгу  $h$  (рис. 4.5); ймовірного рівня надійності конструкції дорожнього одягу від товщини шару ресайклінгу (рис. 4.6); напруження розтягу при згині  $G$  від розрахункового навантаження на вісь автомобіля  $Q$  (рис. 4.7); активного напруження зсуву  $\tau$  від розрахункового навантаження на вісь автомобіля  $Q$  (рис. 4.8).

Таблиця 4.3

Результати розрахунку відновленої конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ – Ковель (км 297+700 – км 302+400)

Товщина шару ресайклінгу, см	Модуль пружності, МПа	Розрахункове навантаження на вісь автомобіля $Q$ , кН	Тиск в шинах $p$ , МПа	Діаметр відбитку $D$ , см	Загальний модуль пружності на поверхні верхнього шару $E$ , МПа	Активне напруження зсуву $\tau$ , МПа	Ймовірний рівень надійності конструкції дорожнього одягу за:	
							пружним прогином	опором розтягу при згині
21	800	100	0,6	37,14	385,32	0,013	0,975	0,971
21	800	110	0,6	38,95	378,83	0,014	0,957	0,959
21	800	115	0,8	34,49	368,25	0,016	0,988	0,960
21	800	130	0,8	36,67	340,08	0,017	0,978	0,89
22	800	100	0,6	37,14	389,24	0,013	0,977	0,967
22	800	110	0,6	38,95	380,95	0,014	0,960	0,955
22	800	115	0,8	34,49	372,35	0,016	0,988	0,958
22	800	130	0,8	36,67	344,28	0,017	0,980	0,884
23	800	100	0,6	37,14	393,47	0,013	0,979	0,966
23	800	110	0,8	34,49	382,34	0,015	0,988	0,959
23	800	115	0,8	34,49	375,77	0,016	0,988	0,956
23	800	130	0,8	36,67	347,46	0,017	0,983	0,955
26	800	100	0,6	37,14	397,33	0,013	0,98	0,963
26	800	115	0,8	34,49	389,46	0,016	0,988	0,952
26	800	130	0,8	36,67	362,28	0,017	0,982	0,876

Результати аналітичних розрахунків по визначенню НДС нежорсткого дорожнього одягу з використанням програми «CREDO РАДОН» приведені в додатку Б дисертаційної роботи.

З рис. 4.2 видно, що при збільшенні товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші від 21 до 26 см загальний модуль пружності на поверхні покриття збільшується від 368,25 МПа до 389,46 МПа при навантаженні на вісь автомобіля  $Q=115$  кН, і від 340,08 МПа до 362,28 МПа при розрахунковому навантаженні  $Q=130$  кН. З графіка, наведеного на рис. 4.2, чітко спостерігається лінійна залежність загального модуля пружності конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу від товщини шару ресайклінгу, де мають місце дві оптимальні точки:

- точка максимуму при  $h=26$  см;
- точка мінімуму при  $h=21$  см.

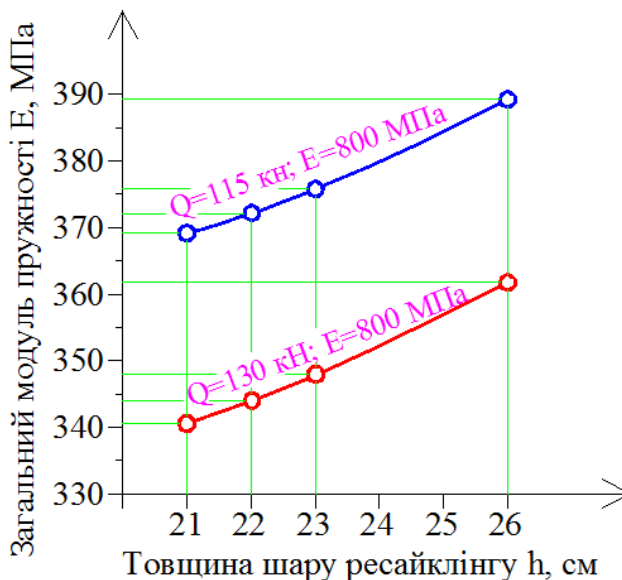


Рис. 4.2 Графік залежності загального модуля пружності дорожнього одягу на поверхні покриття від товщини шару ресайклінгу

На рис. 4.3 зображений графік залежності абсолютного пружного прогину від товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші. З рис. 4.3 видно, що при збільшенні товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші від 21 до 26 см пружний прогин зменшується від 0,674 мм до 0,638 мм при розрахунковому навантаженні на вісь автомобіля  $Q=115$  кН. Зі збільшенням навантаження до 130 кН пружний прогин зменшується від 0,776 мм до 0,729 мм. Залежність максимального вертикального оборотного переміщення від товщини шару ресайклінгу описується за лінійним законом. За даним критерієм

розрахунку оптимальна товщина шару ресайклінгу відповідає значенню  $h=26$  см.

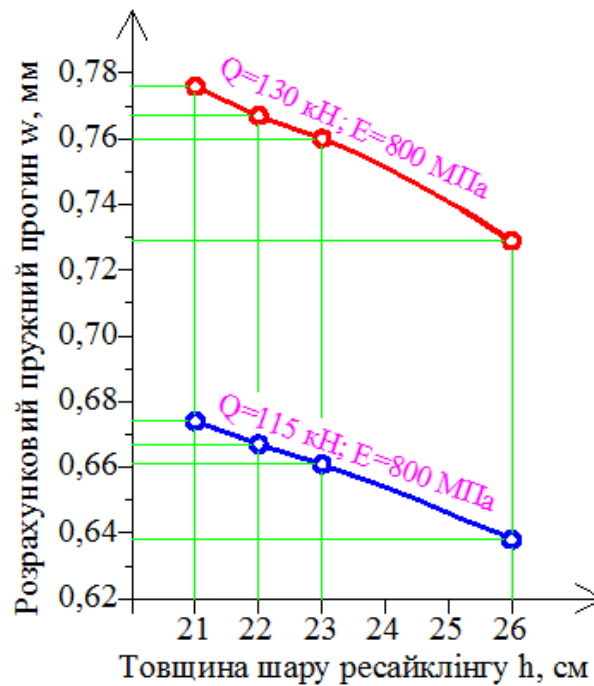


Рис. 4.3 Графік залежності розрахункового пружного прогину дорожнього одягу на поверхні покриття від товщини шару ресайклінгу

На рис 4.4 показано, як змінюється значення активного напруження зсуву  $\tau$  в ґрунті земляного полотна зі збільшенням товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші при розрахунковому осьовому навантаженні 100, 115 і 130 кН. Зі збільшенням товщини шару ресайклінгу від 21 до 26 см активне напруження зсуву збільшується від 0,012 до 0,013 МПа при навантаженні на вісь  $Q=100$  кН і від 0,016 МПа до 0,017 МПа при осьовому навантаженні  $Q=130$  кН. З цього можна зробити висновок, що дана компонента НДС незначним чином реагує на збільшення товщину шару регенерації.

На рис. 4.5 наведений графік залежності розрахункового напруження розтягу при згині  $G$  від товщини шару ресайклінгу  $h$ . Дана компонента НДС змінюється за лінійним законом.

Зі збільшенням товщини шару ресайклінгу від 21 до 26 см напруження

зменшується від 1,382 МПа до 1,349 МПа при навантаженні на вісь  $Q=100$  кН і від 1,819 МПа до 1,757 МПа при осьовому навантаженні  $Q=130$  кН.

Також досліджувався ймовірний рівень надійності дорожньої конструкції в залежності від товщини шару за такими компонентами НДС: розтяг при згині; пружний прогин.

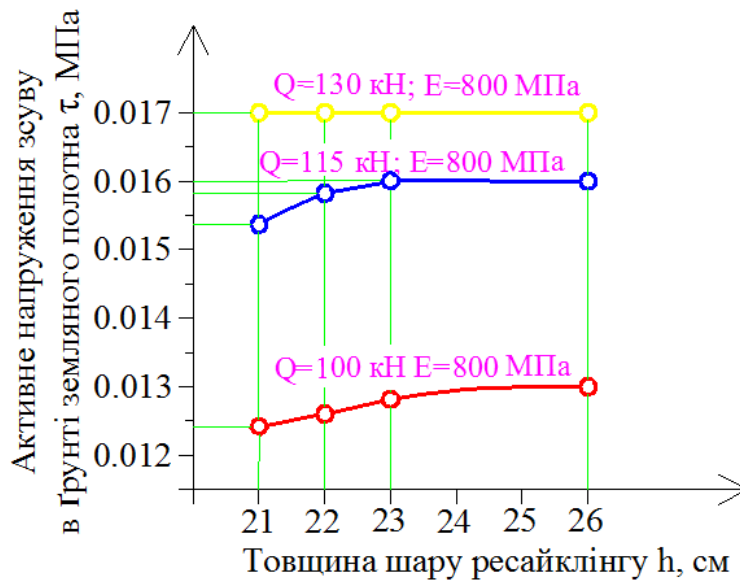


Рис. 4.4 Графік залежності активного напруження зсуву  $\tau$  від товщини шару ресайклінгу  $h$

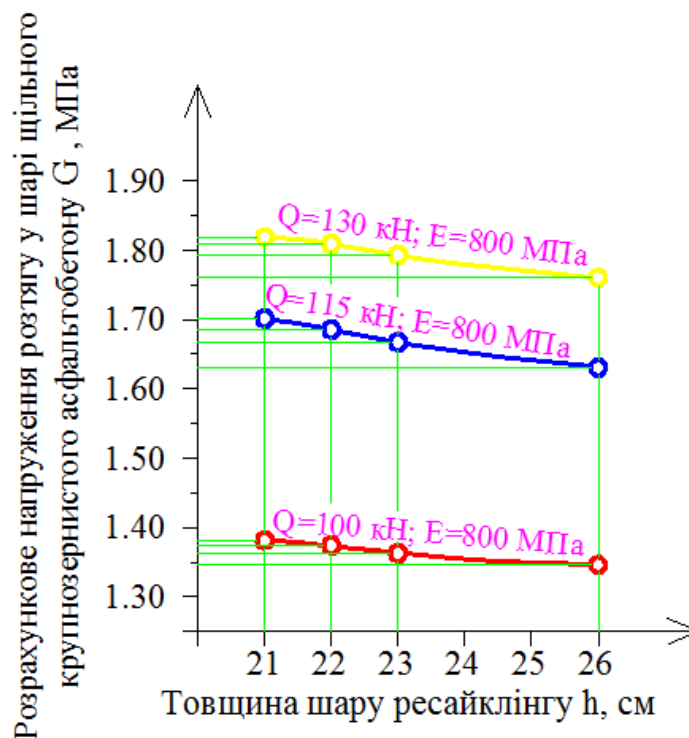


Рис. 4.5 Графік залежності розрахункового напруження розтягу  $G$  від товщини шару ресайклінгу  $h$

За результатами розрахунку, виконаного в програмному комплексі «CREDO РАДОН», встановлено, що зі збільшенням товщини шару із ресайкльованої органо-мінеральної суміші від 21 до 26 см ймовірний рівень надійності дорожньої конструкції за пружним прогином збільшується від 97,5 % до 98,0 % при навантаженні на вісь 100 кН та від 97,8 % до 98,4 % при осьовому навантаженні 130 кН.

Ймовірний рівень надійності дорожньої конструкції при розтягу на згин зменшується від 89,0 % до 88,1 % при навантаженні на вісь автомобіля 130 кН.



Рис. 4.6 Графік залежності ймовірного рівня надійності конструкції дорожнього одягу від товщини шару ресайклінгу  $h$  при осьовому навантаженні  $Q=130$  кН

При цьому слід зазначити, що допустимий рівень надійності для даної дорожньої конструкції становить 90 %.

На рис. 4.7 представлений графік залежності напруження розтягу при згині  $G$  від розрахункового навантаження на вісь автомобіля. З рис. 4.7 видно, що напруження розтягу при згині найбільш стрімко зростає при збільшенні осьового навантаження від 100 до 115 кН. Далі відбувається певна стабілізація. Зі збільшенням розрахункового навантаження від 100 кН до 130 кН, напруження розтягу при згині  $G$  збільшується від 1,389 МПа до 1,828 МПа (при товщині шару ресайклінгу 21 см).

Аналогічно можна сказати і про зміну активного напруження зсуву  $\tau$  від розрахункового навантаження на вісь автомобіля. Зі збільшенням розрахункового навантаження на вісь від 110 до 115 кН активне напруження зсуву  $\tau$  в ґрунті земляного полотна збільшується від 0,014 до 0,015 МПа.

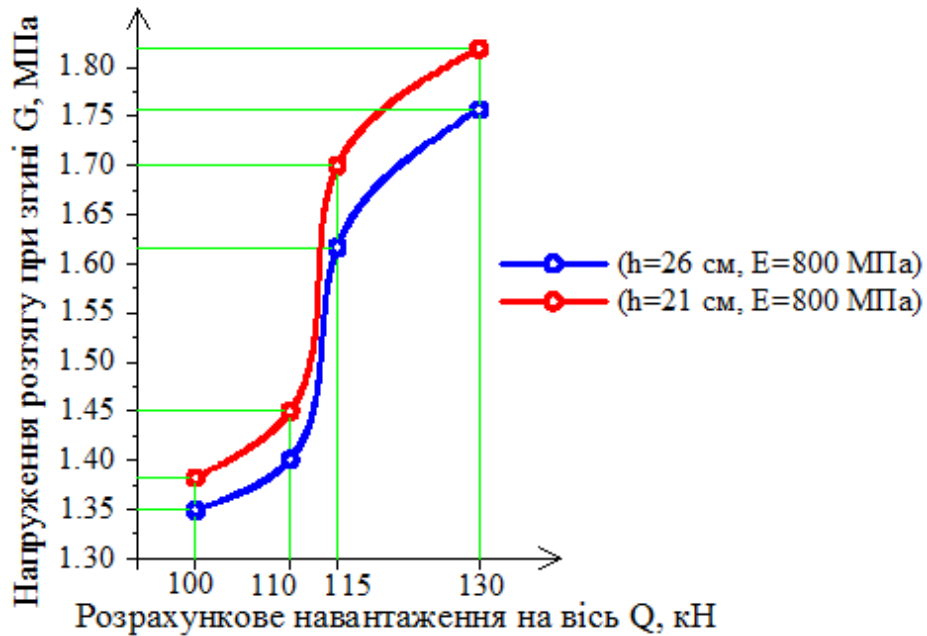


Рис. 4.7 Графік залежності загального модуля пружності дорожнього одягу на поверхні покриття від товщини шару ресайклінгу

Проаналізувавши графіки, наведені на рис. 4.2 – 4.7, можна прийти до висновку, що оптимальна товщина шару ресайклінгу для даної конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу знаходиться в межах 23-26 см. Але через 8,5 років після виконання ремонтно-відновлювальних робіт на цій ділянці були виявлені різні види дефектів (рис. 4.8).



Рис. 4.8 Дефекти на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу

Це пояснюється тим, що товщини конструктивних шарів дорожнього одягу нежорсткого типу не були розраховані. Результати розрахунків, представлені на рис. 4.2 – 4.7 та в додатку Б, не можна вважати цілком

достовірними, оскільки вони не враховують цілий ряд параметрів, які впливають на конструкцію.

Тому для даної конструкції нежорсткого дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу, є потреба в проведенні додаткового науково-дослідного розрахунку з використанням програмного комплексу ARDO, алгоритм якого побудований на основі співвідношень МССЕ.

#### 4.2 Результати чисельних експериментів по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

В якості чисельного експерименту, в результаті виконання якого буде досліджено НДС дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу, була вибрана ділянка автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400). Конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу на цій ділянці наведена в таблиці 4.1. Для того, щоб розв'язати поставлену задачу, було виконано моделювання НДС від дії шасі сучасного автотранспортного засобу з приведенням до еквівалентного навантаження. Розрахунок НДС було виконано на дію автомобіля DAF-FT XF95 та напівпричепа Kögel – GN-24. Відстані між всіма колесами автопоїзда вимірювались за допомогою рулетки як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку (додаток В, рис. В1 – В3) і перевірялись за допомогою довідника [152].

Схема розстановки коліс автомобіля наведена на рис. 4.9.

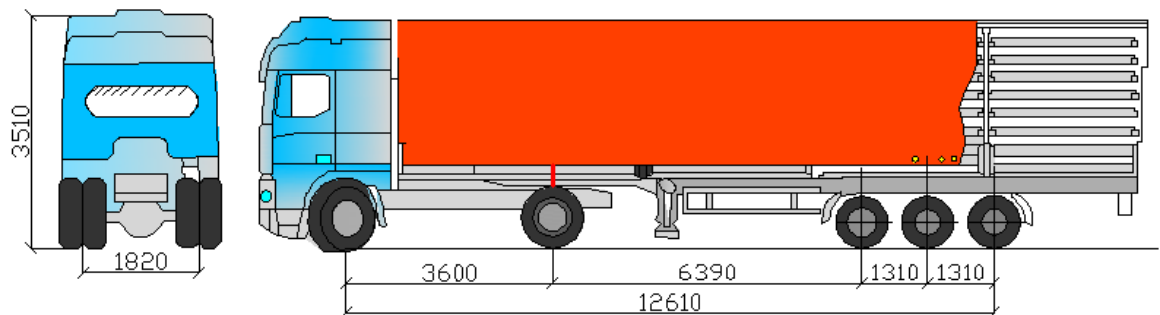


Рис. 4.9 Схема розстановки коліс автомобіля DAF-FT XF95 та напівпричепа Kögel – GN-24 у поздовжньому та поперечному напрямку



Загальна розстановка коліс автопоїзда з визначеними еквівалентними діаметрами відбитку колеса, осьовими навантаженнями та питомими тисками наведена на рис. 4.10.

Розрахункове навантаження на колесо становить 60 кН. При цьому враховувалася відстань між осями розрахункового автомобіля, динаміка та контактна взаємодія шарів. Питомий тиск на колесо коливається в межах від 0,53 МПа до 0,66 МПа.

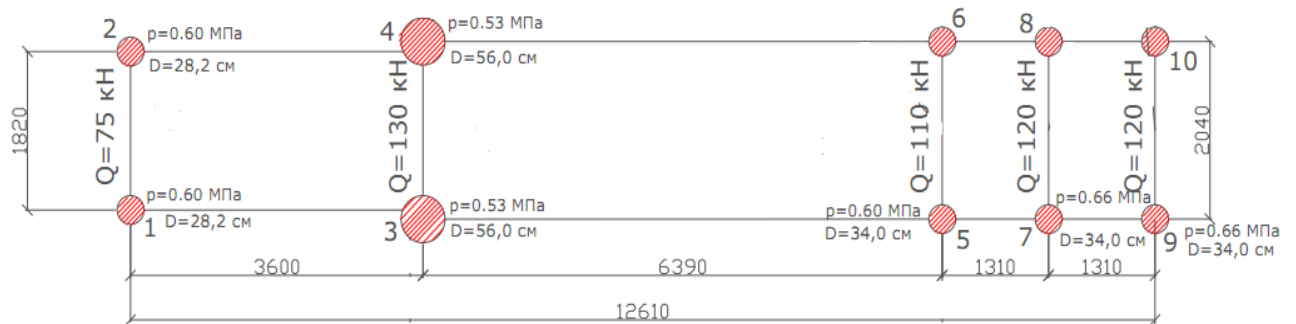


Рис. 4.10 Загальна розстановка коліс автопоїзда DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24

Діаметр відбитку колеса був визначений за формулою (2.1):

$$D = \sqrt{\frac{40 \cdot 69,21}{\pi \cdot 0,75}} = 34,28 \text{ см.}$$

Розрахункова величина діаметра відбитку колеса майже співпадає з вимірним значенням ширини пневматика в статичному положенні (додаток В, рис. В4).

Для отримання чисельних результатів розглядуваної задачі розрахунку нежорсткого дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою, була розроблена просторова скінченно-елементна модель (рис. 4.11), яка має граничні умови:

- за площиною симетрії, яка відповідає координатній площині  $OZ^1Z^3$ , накладаються в'язі на переміщення і кути повороту у напрямку  $Z^2$ ;
- нижня межа півпростору моделює ґрунцію активної зони ґрунтової основи у вигляді защемлення – накладаються в'язі на вузлові переміщення у на-

прямокках  $Z^1, Z^2, Z^3$ ;

- по бічній правій грані півпростору моделюється лінія рухомого шарніру в межах початкового і кінцевого вузлів з сітковими координатами  $N_2 = M2, N_3 = 1; k_2 = M2, k_3 = M3$ ;

- верхня межа півпростору – вільний край.

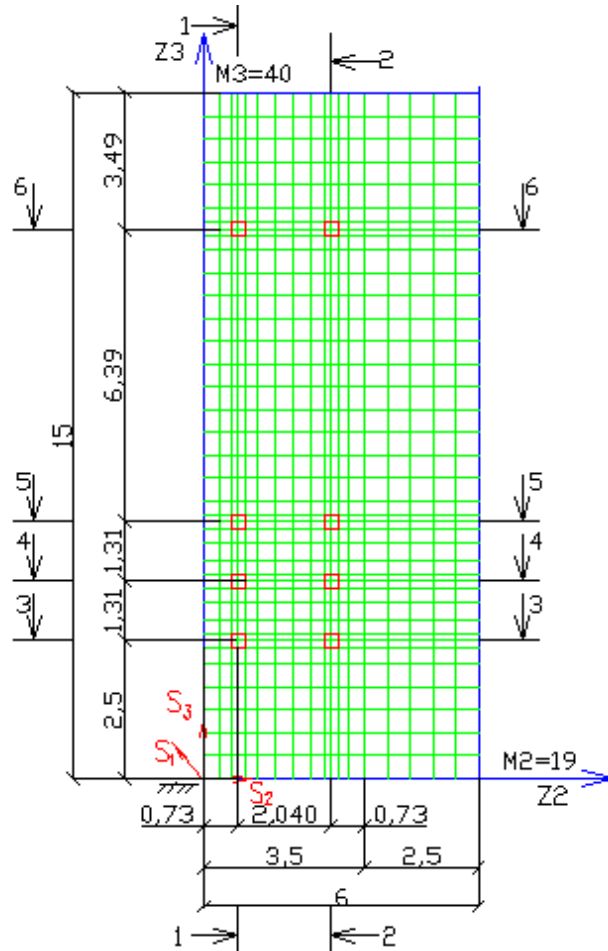


Рис. 4.11 Розрахункова скінченно-елементна модель конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

Дискретна модель розрахункового фрагменту має такі розміри: 40x19. Тобто:  $S_1 = M1 = 1; S_2 = M2 = 19; S_3 = M3 = 40$ . Кількість вузлів скінченно-елементної моделі становить:  $19 \times 40 = 760$ , а кількість скінченних елементів – 702. Більш густіша сітка виконана в зонах прикладання навантаження від коліс автотранспортного засобу DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 (рис. 4.11).

Погонний переріз покриття нежорсткого типу без врахування штучної основи у вигляді ресайклірованої органо-мінеральної суміші приводиться до еквівалентного по поздовжній  $EI$  і згинальній  $EI$  жорсткості (рис.4.12 –4.13).

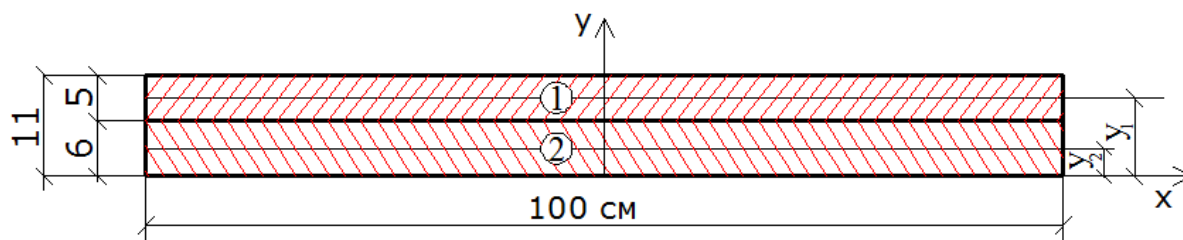


Рис. 4.12 Дійсний переріз плити покриття нежорсткого типу без врахування штучної основи у вигляді ресайклірованої органо-мінеральної суміші

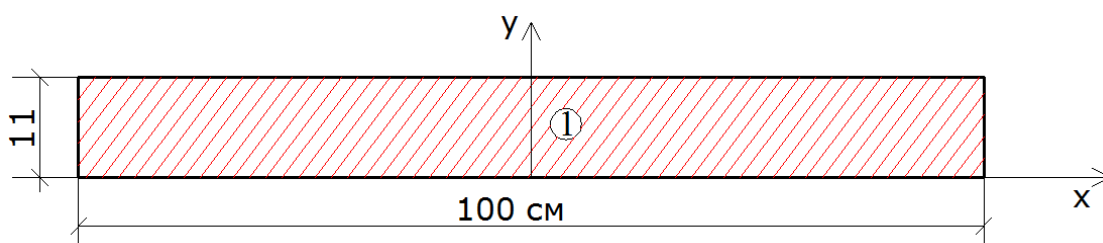


Рис. 4.13 Еквівалентний переріз плити покриття нежорсткого типу

Координата центра тяжіння по вертикалі визначається за формулою (4.1):

$$y_c = \frac{\gamma_1 \cdot S_1^x + \gamma_2 \cdot S_2^x}{\gamma_{сеп.} \cdot F_0}, \quad (4.1)$$

де  $\gamma_1$  – питома вага верхнього шару покриття ( $\gamma_1 = 23,52 \text{ кН/м}^3$ );

$\gamma_2$  – питома вага нижнього шару покриття ( $\gamma_2 = 22,54 \text{ кН/м}^3$ );

$\gamma_{сеп.}$  – середньозважена питома вага з урахуванням товщини шарів покриття ( $\text{кН/м}^3$ );

$S_1^x$  – статичний момент відносно горизонтальної осі  $x$  для верхнього шару покриття,  $\text{м}^3$ ;

$S_2^x$  – статичний момент відносно горизонтальної осі  $x$  для нижнього шару покриття,  $\text{м}^3$ ;

$F_0$  – площа перерізу покриття з урахуванням середньозваженої питомої

ваги,  $m^2$ :

$$\bar{F}_0 = F_0 \cdot \gamma_{сep.}, \quad (4.2)$$

$F_0$  – початкова площа перерізу покриття,  $m^2$ .

Середньозважена питома вага погонного перерізу покриття дорожнього одягу нежорсткого типу визначається за формулою (4.3):

$$\gamma_{сep.} = \frac{t_1 \gamma_1 + t_2 \cdot \gamma_2}{t_{tot.}}, \quad (4.3)$$

де  $t_1$  – товщина верхнього шару покриття, м;

$t_2$  – товщина нижнього шару покриття, м.

$$t_{tot.} = t_1 + t_2 = 0,05 + 0,06 = 0,11 \text{ .} \quad (4.4)$$

Тоді середньозважена питома вага погонного перерізу покриття дорожнього одягу нежорсткого типу становить:

$$\gamma_{сep.} = \frac{0,05 \cdot 23,52 + 0,06 \cdot 22,54}{0,11} = 22,98 \text{ кН/м}^3; \quad F_0 = F_1 + F_2 = 0,05 + 0,06 = 0,11 \text{ м}^2 \text{ .}$$

Тоді площа перерізу з урахуванням середньозваженої питомої ваги за (4.3) становить:

$$\bar{F}_0 = 0,11 \cdot 22,98 = 2,5278 \text{ м}^2 \text{ .}$$

Статичні моменти відносно осі  $x$  становлять:

$$S_1^x = F_1 \cdot y_1 = 0,05 \cdot 0,085 = 0,00425 \text{ м}^3;$$

$$S_2^x = F_2 \cdot y_2 = 0,06 \cdot 0,03 = 0,0018 \text{ м}^3 \text{ .}$$

Тоді центр ваги перерізу дискретної моделі реальної конструкції покриття дорожнього одягу за формулою (4.1) становить:

$$y_c = \frac{23,52 \cdot 0,00425 + 22,54 \cdot 0,0018}{22,98 \cdot 0,11} = 0,055 \text{ м} \text{ .}$$

Моменти інерції дискретної моделі реального перерізу відносно координат з початком в центрі тяжіння визначаються за формулою (4.5):

$$I_{0x} = I_{0x}^1 + I_{0x}^2, \quad (4.5)$$

де  $I_{0x}^1$  – момент інерції відносно осі  $x$  для верхнього шару покриття;

$I_{0x}^2$  – момент інерції відносно осі  $x$  для нижнього шару покриття.

Момент інерції для верхнього та нижнього шару покриття визначається за формулою (4.6) і (4.7) відповідно:

$$I_{0x}^1 = \frac{b \cdot t_1^3}{12} + F_1 (y_1 - y_c)^2, \quad (4.6)$$

$$I_{0x}^2 = \frac{b \cdot t_2^3}{12} + F_2 (y_1 - y_c)^2, \quad (4.7)$$

де  $b$  – ширина погонного перерізу, м.

Таким чином: 
$$I_{0x}^1 = \frac{100 \cdot 5^3}{12} + 500 \cdot (8,5 - 5,5)^2 = 5,541 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$$

$$I_{0x}^2 = \frac{100 \cdot 6^3}{12} + 600 \cdot (3 - 5,5)^2 = 1800 + 3750 = 5,55 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$$

Тоді момент інерції дискретної моделі реального перерізу дорожнього покриття становить:  $I_{0x} = 5,541 + 5,550 = 11,091 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$

Згинальна жорсткість перерізу покриття на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) становить:

$$EI_{0x} = 313,81 \cdot 11,091 \cdot 10^3 = 3,48 \cdot 10^6 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2.$$

Поздовжня жорсткість перерізу покриття становить:

$$EF_0 = 313,81 \cdot 100 \cdot 11 = 3,45 \cdot 10^5 \text{ кгс}$$

Із умови еквівалентності по поздовжній і згинальній жорсткості перерізів реальної і умовної плити покриття на одиницю ширини утворюється два рівняння з двома невідомими:  $t_e$  – товщина умовної плити;  $E_e$  – еквівалентний модуль пружності умовної плити.

$$\begin{cases} E_e \cdot \frac{t_e^3}{12} \cdot 100 = E \cdot I_{(ox)}^0 \\ E_e \cdot 100 \cdot t_e = EF^0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$t_e = \sqrt{\frac{12EI_{(ox)}^0}{EF^0}}. \quad (4.9)$$

Для даної конструкції покриття дорожнього одягу еквівалентна товщина

плити покриття становить:

$$t_e = \sqrt{\frac{12 \cdot 3,48 \cdot 10^6}{3,45 \cdot 10^5}} = 11 \text{ см} = 0,11 \text{ м.}$$

Тоді еквівалентний модуль пружності для покриття становить:

$$E_e = \frac{EF_0}{100 \cdot t_e} = \frac{3,45 \cdot 10^5}{100 \cdot 11} = 3200 \text{ МПа.} \quad (4.10)$$

За результатами чисельного експерименту отримані значення: вертикальних переміщень  $u_{1 \max}$  по напрямку  $Z_1$  глобальної системи координат; горизонтальних переміщень  $u_{2 \max}$  по напрямку  $Z_2$  глобальної системи координат; реакцій ґрунтової основи  $R^1$ ; дотичних напружень  $\tau^{23}$  на верхній площадці покриття дорожнього одягу нежорсткого типу; вертикальних нормальних напружень  $\sigma_1$ ; горизонтальних нормальних напружень  $\sigma_2$ .

Компоненти напружено-деформованого стану отримані для різних комбінацій шару щебеню і регенованого шару. Товщина шару щебеню змінювалась від 0 до 5 см, а шару ресайклінгу – від 21 до 26 см.

У табл. 4.4 – 4.5 наведені максимальні і мінімальні значення компонентів НДС нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400). Кожна таблиця містить по 6 варіантів призначення товщини регенованого шару.

Таблиця 4.4

Результати чисельного розрахунку відновленої конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ – Ковель (км 297+700 – км 302+400) при відсутності шару відсіву

№	$h_2, \text{м}$	Переміщення $u^1, \text{мм}$ max/min	Переміщення $u^2, \text{мм}$ min/max	Реактивний опір ґрунту, $R^1, \text{кПа}$ , max/min	Напруження на верх. площ $\tau^{23}, \text{МПа}$ min/max	$\gamma_{\text{ср}}, \text{кН/м}^3$	$E_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\sigma_1, \text{МПа}$
1	0,21	-0,94/0,11	-0,0419/0,0401	-38,2/4,6	-0,29/0,08	18,43	1050	-0,71
2	0,22	-0,93/0,11	-0,0412/0,0394	-38,0/4,6	-0,28/0,07	18,46	1045	-0,70
3	0,23	-0,93/0,12	-0,0404/0,0387	-37,8/4,7	-0,27/0,07	18,48	1041	-0,70
4	0,24	-0,92/0,12	-0,0397/0,0380	-37,6/4,8	-0,27/0,06	18,50	1036	-0,69
5	0,25	-0,92/0,12	-0,0389/0,037	-37,4/4,8	-0,25/0,06	18,52	1032	-0,69
6	0,26	-0,91/0,12	-0,0382/0,036	-37,2/4,9	-0,25/0,06	18,54	1028	-0,68

Результати чисельного розрахунку відновленої конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ – Ковель (км 297+700 – км 302+400) при товщині шару відсіву  $h_3=5$  см

№	$h_2, \text{м}$	Переміщення $u^1, \text{мм}$ max/min	Переміщення $u^2, \text{мм}$ min/max	Реактивний опір ґрунту, $R^1, \text{кПа}$ , max/min	Напруження на верх. площ $\tau^{23}, \text{МПа}$ min/max	$\gamma_{\text{ср}}, \text{кН/м}^3$	$E_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\sigma_1, \text{МПа}$
1	0,21	-0,92/0,12	-0,0395/0,0379	-37,7/4,8	-0,26/0,08	18,43	1050	-0,71
2	0,22	-0,92/0,12	-0,0388/0,0372	-37,5/4,8	-0,25/0,07	18,46	1045	-0,70
3	0,23	-0,91/0,12	-0,0375/0,0360	-37,1/4,9	-0,24/0,07	18,48	1041	-0,70
4	0,24	-0,90/0,12	-0,0368/0,0354	-36,9/5,0	-0,23/0,06	18,50	1036	-0,69
5	0,25	-0,90/0,12	-0,0362/0,0348	-36,7/5,0	-0,22/0,06	18,52	1032	-0,69
6	0,26	-0,90/0,12	-0,0357/0,0343	-36,5/5,0	-0,22/0,06	18,54	1028	-0,69

Збільшення товщини регенованого шару призводить до зменшення максимальних за абсолютним значенням дотичних напружень  $\tau^{23}$  на 14-15 %, а реакцій ґрунту  $R^1$  – на 2,5 – 3 %. Вертикальні нормальні напруження зменшуються на 3– 4 %.

На рис. 4.14 а, б наведені графіки залежності вертикальних переміщень  $u_1$  від товщини шару ресайклінгу  $h_2$  на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) при товщині шару відсіву 0 та 5 см.

Максимальне вертикальне переміщення, отримане за результатами чисельного експерименту, становить 0,94 мм при товщині шару відсіву 0 см і товщині шару ресайклінгу 21 см, а мінімальне – 0,90 мм (при товщині 26 см).

З графіків, наведених на рис. 4.14 а, б чітко видно дві оптимальні точки: точку максимуму, яка відповідає товщині шару ресайклінгу 21 см і точка мінімуму, яка відповідає товщині 26 см. Графіки залежностей, наведених на рис. 4,14 а, б можна апроксимувати прямою.

Горизонтальні переміщення  $u_{2 \text{ max}}$  за напрямком  $Z_2$  глобальної системи координат визначались при товщині шару ресайклінгу від 21 до 26 см та товщині шару відсіву від 0 до 5 см. Максимальні за абсолютним значенням горизонтальні переміщення  $u_{2 \text{ max}}$  досягають величини 0,042 мм при товщині ре-

ресайклінгу 21 см і відсутності шару відсіву (рис.4.15 а, б).

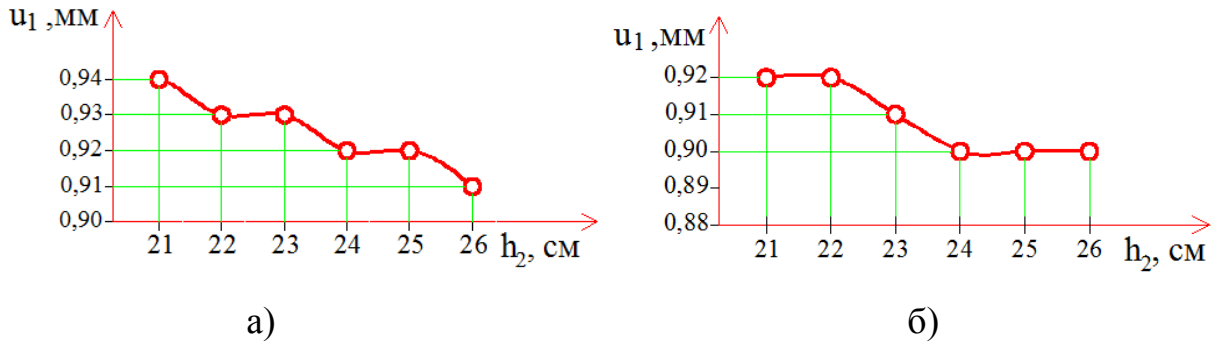


Рис. 4.14 Графік залежності максимального за абсолютним значенням вертикального переміщення  $u_{1 \max}$  від товщини шару ресайклірованої органіно-мінеральної суміші: а) при відсутності шару відсіву; б) при товщині шару відсіву  $h_3=5$  см

Горизонтальне переміщення зі збільшенням товщини шару ресайклінгу від 21 до 26 см зменшується за лінійною залежністю, що і видно на рис. 4.15 а, б. Лінійна залежність цих двох величин спостерігається також і при товщині шару відсіву 5 см (рис. 4.15, б).

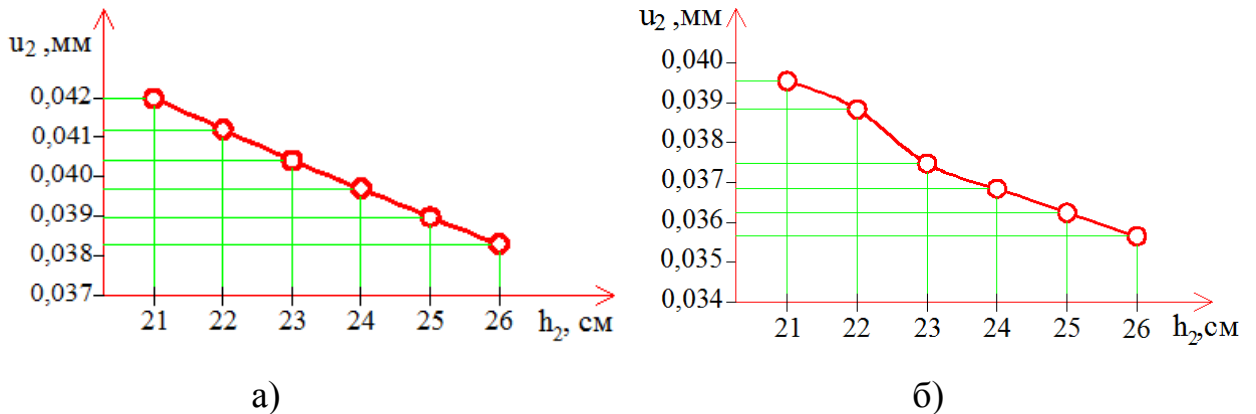


Рис. 4.15 Графік залежності максимального за абсолютним значенням горизонтального переміщення  $u_{2 \max}$  від товщини шару ресайклірованої органіно-мінеральної суміші: а) при відсутності шару відсіву; б) при товщині шару відсіву  $h_3=5$  см

На рис. 4.16, а-б наведено ізолінії вертикальних  $\sigma_1$  і горизонтальних  $\sigma_2$  нормальних напружень, отриманих за результатами чисельного експерименту



по дослідженню НДС дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) при однократному проїзді автопоїзду DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 та значенні товщини регенованого шару, що дорівнює 23 см.

Максимальні вертикальні напруження  $\sigma_1$  спостерігаються на поверхні покриття під лівим колесом середньої осі напівпричепу автопоїзда і становлять -0,722 МПа. Горизонтальні напруження  $\sigma_2$  досягають максимального значення -0,95 МПа. Під віссю лівих коліс максимальні вертикальні напруження є на 7-10 % більшими, ніж під віссю правих коліс. Під задньою віссю тягача вертикальні нормальні напруження зменшуються і досягають величини -0,532 МПа, що на 26,32 % менше, ніж під центральною віссю напівпричепу автопоїзда. Аналогічно і горизонтальні напруження на 10,53 % під задньою віссю тягача є меншими, ніж під середньою віссю напівпричепу (рис. 4.16, б).

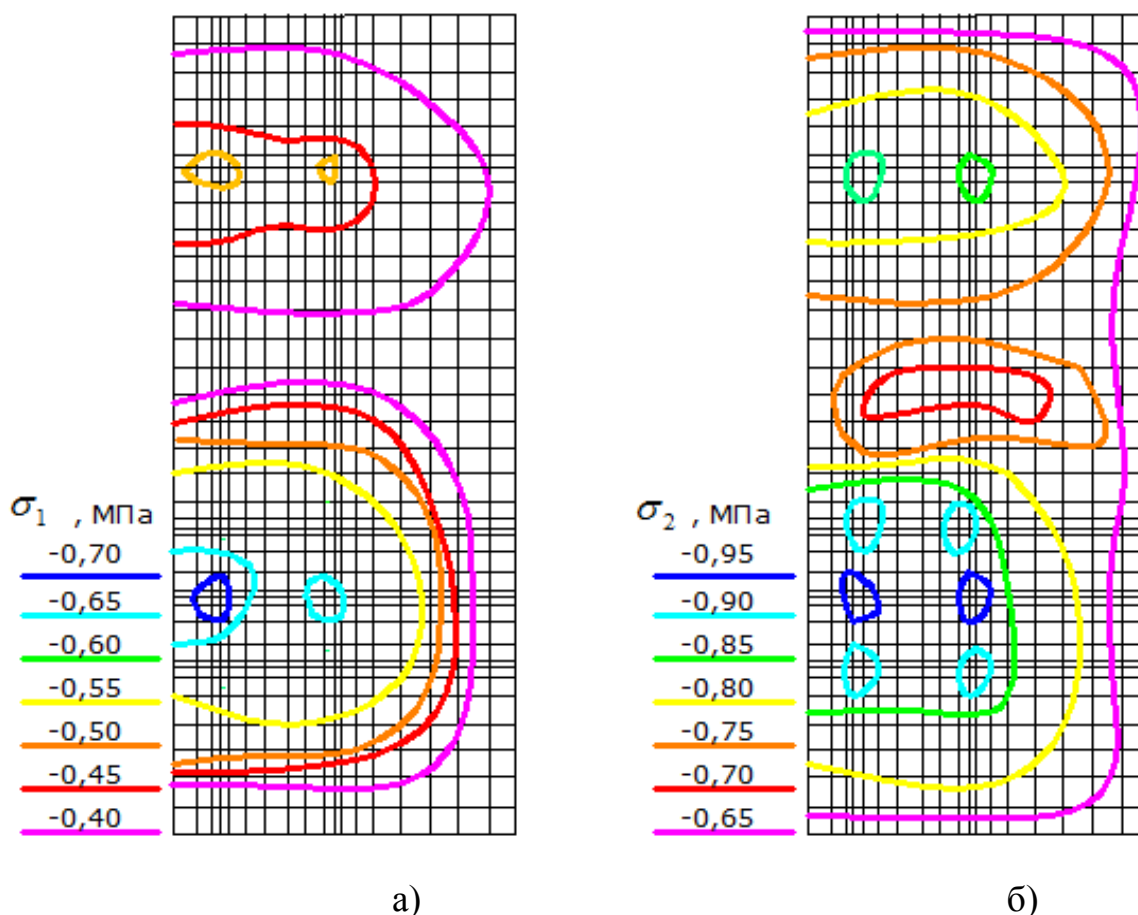


Рис. 4.16 Ізолінії компонентів нормальних напружень:

а) вертикальних  $\sigma_1$ , МПа; б) горизонтальних  $\sigma_2$ , МПа

Слід зазначити, що зі збільшенням товщини шару ресайклірованої органо-мінеральної суміші, вертикальні та горизонтальні напруження практично не змінюються.

Рухаючись ближче в сторону узбіччя, піки концентрацій напружень зменшуються і досягають значення: для вертикальних напружень  $-0,39$  МПа, для горизонтальних напружень  $-0,65$  МПа.

На рис. 4.17 а, б наведені графіки залежності реактивного опору ґрунту  $R^1$  від товщини шару ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400). Аналізуючи дані залежності, можна прийти до висновку, що реактивний опір ґрунту  $R^1$  зменшується за лінійною залежністю. Зі збільшенням товщини регеноерованого шару від 21 до 26 см реактивний опір ґрунту зменшується від 38,3 кПа до 37,2 кПа за абсолютним значенням.

Графіки залежностей максимального за абсолютним значенням дотичного напруження  $\tau^{23}$  на верхній площадці від товщини шару ресайклінгу  $h_2$  наведені на рис. 4.18 а, б.

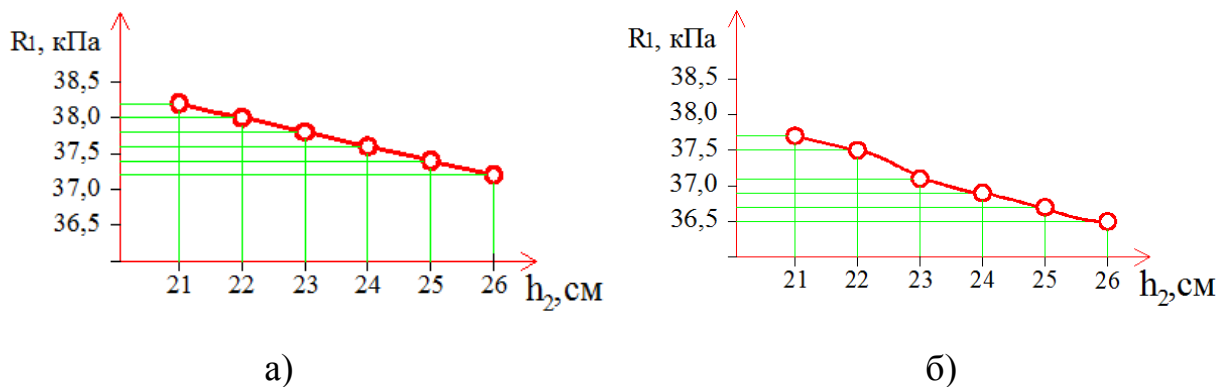


Рис. 4.17 Графік залежності реактивного опору ґрунту  $R^1$  від товщини шару ресайклінгу  $h_2$  на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400):

а) – при відсутності шару відсіву; б) – при товщині шару відсіву  $h_3=5$  см

Таким чином, збільшення товщини шару регенерації від 21 до 26 см на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) призводить до: підвищення стійкості на зсув дорожньої конструкції на 15 %;

зменшення вертикальних переміщень  $u_1$  на 3 %; зменшення горизонтальних переміщень  $u_2$  на 9,6 %; зменшення значення вертикальних нормальних напружень  $\sigma_1$  на 4,2 %; зменшення реакцій ґрунту на 3,18 %.

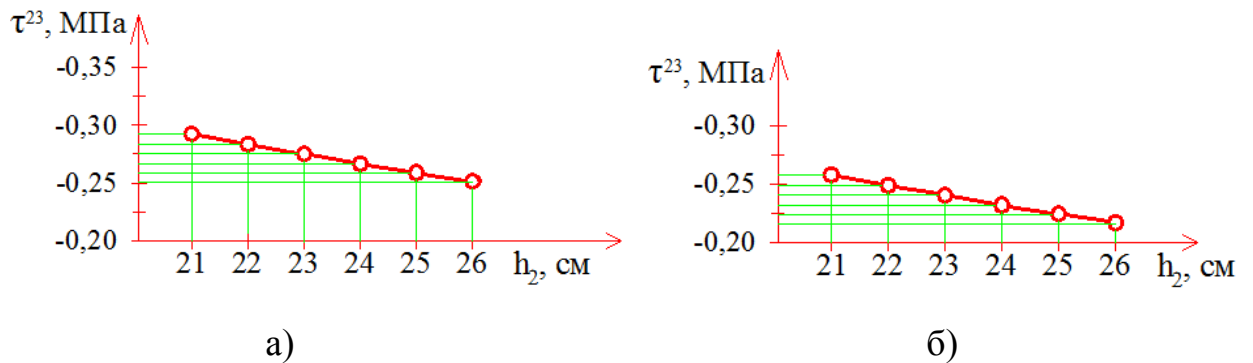


Рис. 4.18 Графік залежності максимального за абсолютним значенням дотичного напруження  $\tau^{23}$  від товщини шару ресайклінгу  $h_2$  на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

а) – при відсутності шару відсіву; б) – при товщині шару відсіву  $h_3=5$  см

На рис. 4.19 – 4.20 наведені графіки зміни реакцій ґрунту в поздовжньому напрямку  $Z_3$  глобальної системи координат скінченно-елементної моделі під віссю лівих і правих коліс автомобіля DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN.

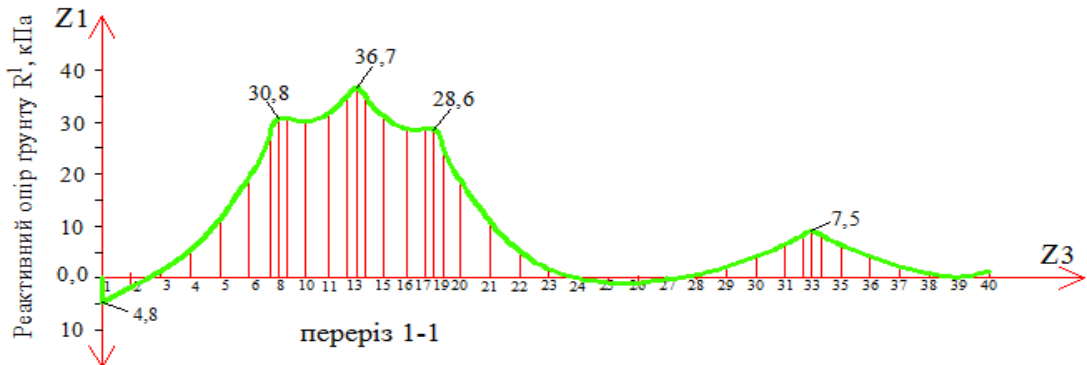


Рис. 4.19 Реакції ґрунту по осі лівих коліс розрахункового автопоїзда

Максимальне значення реакції ґрунту становить -36,7 кПа під лівим колесом, яке знаходиться на центральній осі напівпричепу Kögel– GN-24. Під правим колесом максимальне значення реакцій ґрунту  $R^1$  становить 29,4 кПа.

Різниця між величинами складає:  $\Delta = \frac{(36,7 - 29,4)}{36,7} \cdot 100 = 19,89\%$ .



## Результати чисельного розрахунку вертикальних переміщень

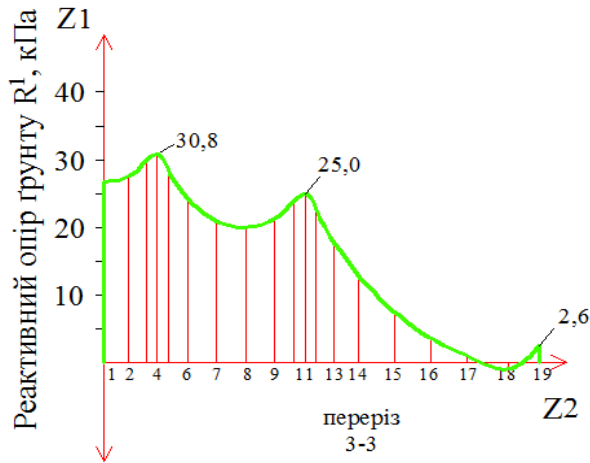
Розрізи											
Розріз 1-1		Розріз 2-2		Розріз 3-3		Розріз 4-4		Розріз 5-5		Розріз 6-6	
№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм	№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм	№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм	№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм	№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм	№ вузла	Вертикальні переміщення $u^1$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	0,1	21	0,07	267	-0,65	457	-0,78	647	-0,61	1217	-0,19
45	0,05	59	0,02	269	-0,68	459	-0,82	649	-0,64	1219	-0,21
83	-0,1	97	-0,02	271	-0,7	461	-0,87	651	-0,67	1221	-0,22
121	-0,14	135	-0,1	273	-0,76	463	-0,9	653	-0,69	1223	-0,24
159	-0,28	173	-0,21	275	-0,68	465	-0,89	655	-0,65	1225	-0,22
197	-0,48	211	-0,37	277	-0,62	467	-0,74	657	-0,58	1227	-0,16
235	-0,68	249	-0,54	279	-0,52	469	-0,65	659	-0,48	1231	-0,13
253	-0,69	287	-0,56	281	-0,54	471	-0,57	661	-0,44	1233	-0,15
311	-0,71	325	-0,57	283	-0,48	473	-0,64	663	-0,46	1235	-0,16
349	-0,75	363	-0,59	285	-0,58	475	-0,7	665	-0,53	1237	-0,17
387	-0,78	401	-0,61	287	-0,61	477	-0,75	667	-0,55	1239	-0,24
425	-0,85	439	-0,68	289	-0,54	479	-0,66	669	-0,51	1241	-0,16
463	-0,93	477	-0,75	291	-0,42	481	-0,54	671	-0,42	1243	-0,13
501	-0,91	517	-0,67	293	-0,32	483	-0,45	673	-0,3	1245	-0,09
539	-0,85	553	-0,60	295	-0,18	485	-0,23	675	-0,17	1247	-0,04
577	-0,74	519	-0,58	297	-0,09	487	-0,14	677	-0,09	1249	-0,02
617	-0,71	629	-0,56	299	-0,02	489	-0,04	679	-0,02	1251	-0,01
653	-0,69	667	-0,54	301	0,02	491	0,03	681	0,02	1253	0,0
691	-0,62	705	-0,51	303	0,07	493	0,08	683	0,07	1255	0,01

На рис. 4.21 – 4.22 наведені значення реакцій ґрунту під першою, другою та третьою віссю напівпричепа автопоїзду, а також під задньою віссю тягача (перерізи 3-3, 4-4, 5-5, 6-6). Найбільші реакції ґрунту земляного полотна виникають під лівими колесами центральної осі напівпричепу автопоїзда.

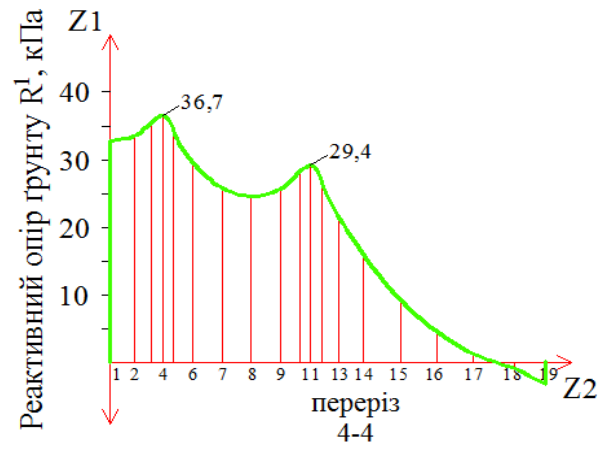
Відносні різниці між значеннями реакцій ґрунту земляного полотна під лівими і правими колесами автопоїзда складають:

- для перерізу 3-3 – 18,83 %;
- для перерізу 4-4 – 19,89 %;
- для перерізу 5-5 – 19,23 %;

- для перерізу 6-6 – 17,04 %.

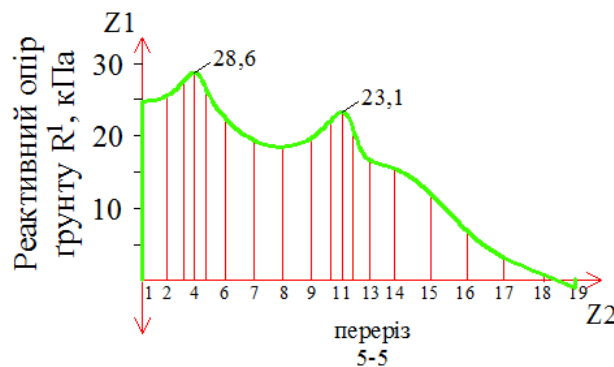


а)

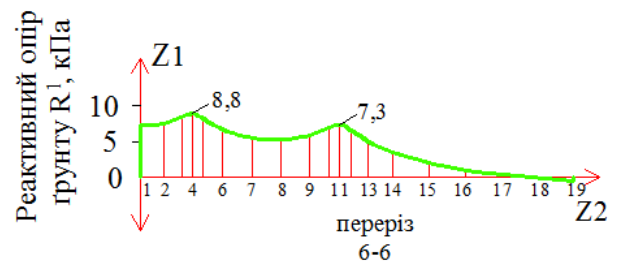


б)

Рис. 4.21 Реакції ґрунту: а) під задньою віссю напівпричепа автопоїзда; б) під середньою віссю напівпричепа автопоїзда



а)



б)

Рис. 4.22 Реакції ґрунту: а) під передньою віссю напівпричепа автопоїзда; б) під передньою віссю тягача

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що під лівими колесами автопоїзда DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 значення реакцій ґрунту є на 17-20 % більшими, ніж під правими колесами. Це можна пояснити тим, що навантаження від автопоїзда відносно осі дороги є симетричним.

На ділянках, наближених до осі проїзної частини, реакції ґрунту, переміщення та напруження будуть дещо більшими від тих, які виникають в місцях, віддалених від осі в сторону брівки земляного полотна.

Ізополя реакцій ґрунту земляного полотна та вертикальних переміщень зображені на рис. 4.23 а, б.

Максимальні реакції ґрунту земляного полотна дещо зміщені в ліву сторону від центру відбитку лівого колеса середньої осі напівпричепу автопоїзда і досягають величини  $-38,3$  кПа (рис. 4.23, а). Це відповідає вузлам 421, 427, 459, 461, 465, 503 та 507 скінченно-елементної моделі. Аналогічна картина спостерігається під центром відбитку правого колеса, де максимальні реакції становлять  $-33,1$  кПа. Під центром відбитку коліс передньої та задньої осі напівпричепу автопоїзда (перерізи 3-3 та 5-5) реакції зменшуються та коливаються в межах від  $-25,7$  до  $-33,1$  кПа.

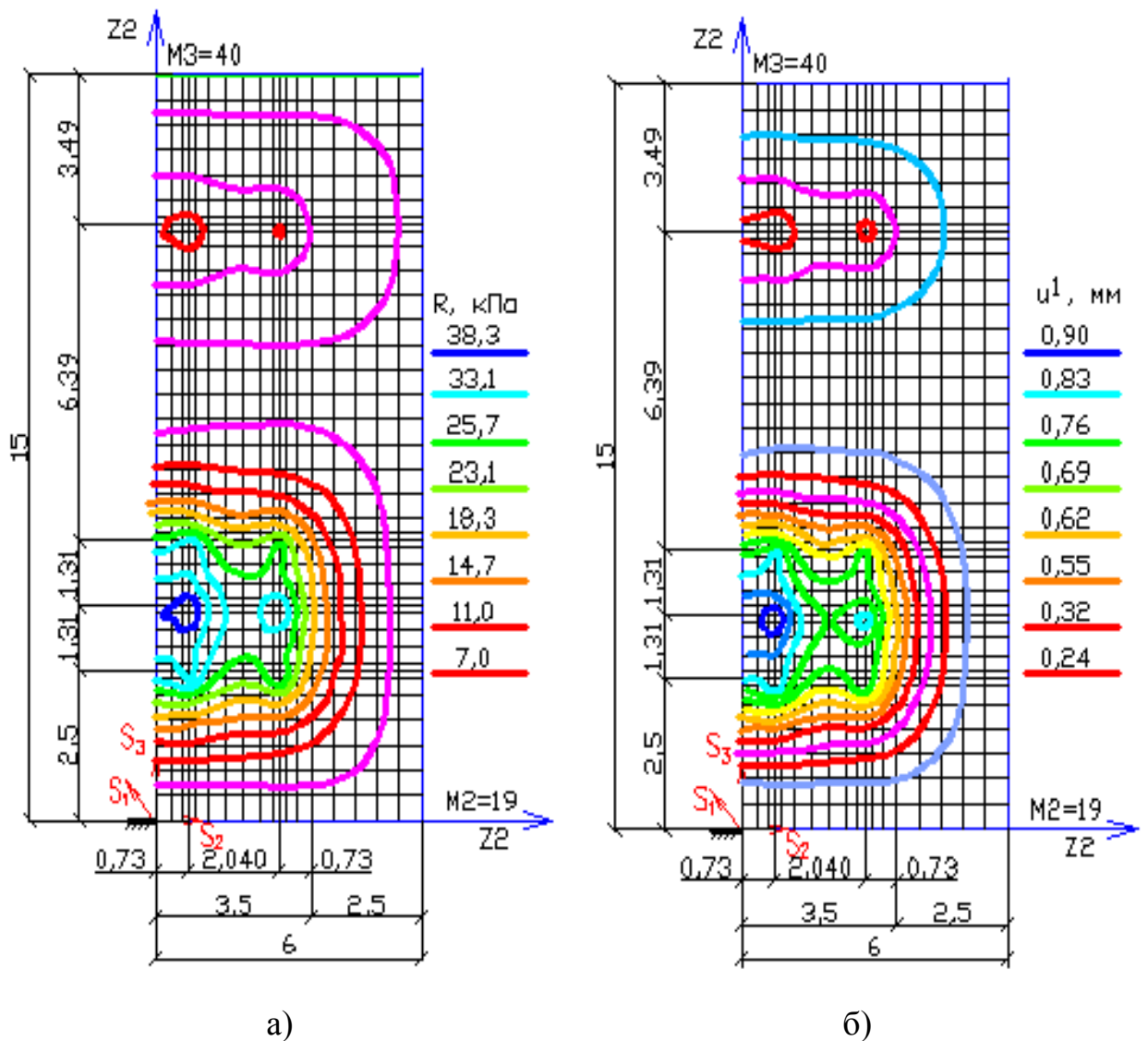


Рис. 4.23 Ізолінії: а) реакцій ґрунту земляного полотна  $R^1$ , кПа ; б) вертикальних переміщень  $u^1$ , мм

Максимальні вертикальні переміщення по осі глобальної системи координат  $Z1$  складають 0,93 мм і локалізуються у вузлах 423, 425, 427, 459, 465, 499, 501 та 503 скінченно-елементної моделі. Під центром відбитку правого колеса центральної осі напівпричепу автопоїзда максимальні вертикальні переміщення зменшуються і досягають величини 0,76 мм (вузли 475 та 477). Рухаючись вправо вздовж осі  $Z2$  глобальної системи координат, вертикальні переміщення зменшуються до величини 0,1 мм (на ділянці узбіччя).

На рис. 4.24 та рис. 4.25 наведено графіки, які показують зміну значень вертикальних переміщень вздовж осі глобальної системи координат під віссю лівих та правих коліс автопоїзда DAF-FT XF95+напівпричеп Kögel GN-24.

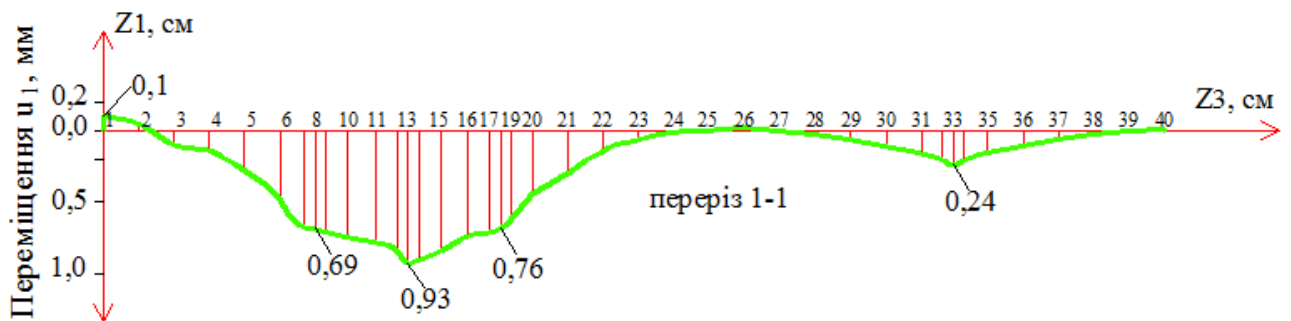


Рис. 4.24 Графік зміни вертикальних переміщень  $u_1$  під віссю лівих коліс автопоїзда

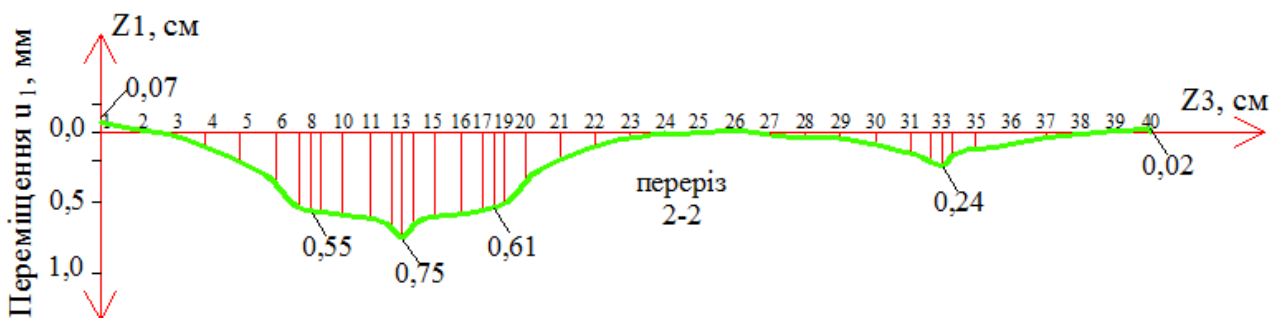


Рис. 4.25 Графік зміни вертикальних переміщень  $u_1$  під віссю правих коліс автопоїзда

З рис. 4.24 та 4.25, чітко видно, що максимальні вертикальні переміщення під лівим і правим колесом центральної осі напівпричепу автопоїзда досягають  $u_1=0,93$  мм та  $u_1=0,75$  мм відповідно. Під центром відбитку лівого колеса тягача



вертикальні переміщення майже в чотири рази є меншими, ніж під колесом, яке знаходиться на центральній осі напівпричепу.

На рис. 4.26, а–г наведені графіки зміни вертикальних переміщень по всій ширині ділянки дороги. Під віссю лівих коліс вертикальні переміщення є більшими, ніж під віссю правих коліс в середньому на 19-20 %. А це означає, що товщина шару підсилення (в даному випадку – шар із ресайклірованої органо-мінеральної суміші) має поступово зменшуватись, починаючи від осі проїзної частини і закінчуючи кромкою.

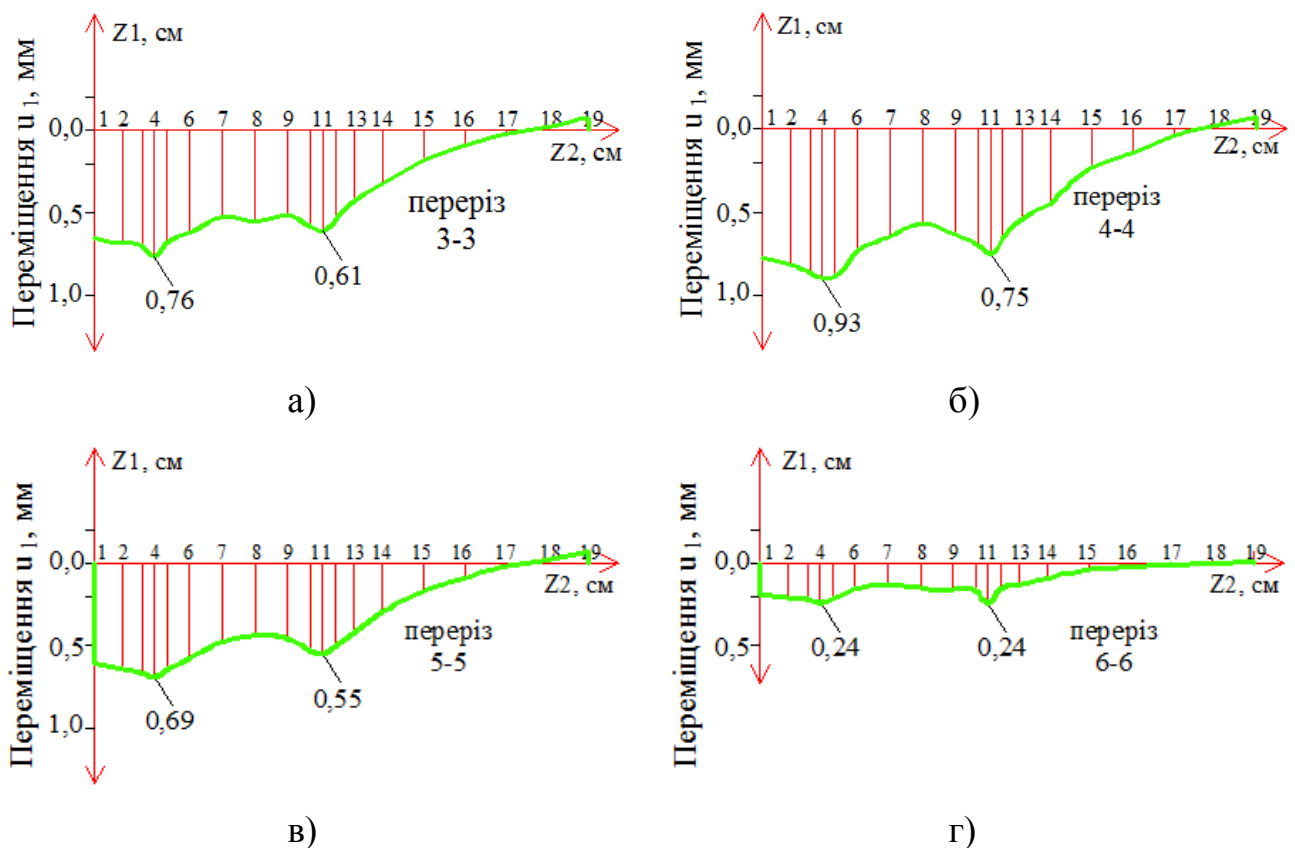


Рис. 4.26 Графік зміни вертикальних переміщень  $u_1$  по всій ширині ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель (при прикладанні однократного навантаження від автопоїзду DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24): а) під задньою віссю напівпричепа автопоїзда; б) під середньою віссю напівпричепа; в) під передньою віссю напівпричепа; г) під задньою віссю тягача

Окрім цього, було проведено детальне візуальне обстеження ділянки автомобільної дороги через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу.

На покритті мають місце локальна сітка тріщин, ямковість, колії, місцями руйнації, викришування верхнього шару. Фотоматеріали дефектів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – 302+400) наведені на рис. 4.27.



Рис. 4.27 Фотоматеріали дефектів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – 302+400) через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу

Локальна сітка тріщин в шарах асфальтобетону виникає в нижній частині шару, де напруження розтягу, викликані навантаженнями від коліс, є максимальними.

Основною причиною виникнення колії в поздовжньому напрямку на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – 302+400) є високий ріст вантажнапруженості як кількісно, так і якісно. Також причинами колієутворення на даній ділянці дороги є недотримання товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, а також фізична природа більшості дорожньо-будівельних матеріалів і ґрунтів. Із рис. 4.27 видно, що найбільш виражені дефекти спостерігаються під лівою і правою смугою накату. Тому і розташування розрахункового автопоїзду при виконанні чисельного розрахунку вибиралось із урахуванням коефіцієнту поперечної установки (2.26) і ймовірності потрапляння коліс слід у слід.

Через 8,5 років спостерігається викришування верхнього шару покриття

Причина даного виду дефекту одна – неякісно влаштований замикаючий шар. Згідно з [153] норми міжремонтних строків експлуатації дорожніх одягів становлять 12 років (для капітального типу). А дефекти на даній ділянці автомобільної дороги спостерігаються вже на дев'ятий рік після виконання холодного ресайклінгу. Це свідчить про одне: невірно прийняті проектні рішення по призначенню як товщин шарів покриття, так і основи (ресайклірованої органо-мінеральної суміші), оскільки не в повній мірі враховувався вплив від дії автотранспортних засобів, навантаження на вісь у яких перевищує нормативне.

#### **4.3 Дослідження розвитку і поширення залишкових деформацій після виконання холодного ресайклінгу**

Виконаємо дослідження НДС ґрунтового півпростору при взаємодії дорожнього одягу з ґрунтовою основою в плоскій постановці задачі з врахуванням фізичної і геометричної нелінійності. Дослідження зміни НДС матеріалів конструкції дорожнього одягу по ширині та глибині при дії смугового навантаження розглянемо на прикладі ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400). Розрахункові значення параметрів матеріалів дорожніх конструктивних елементів наведено в табл. 4.2. Геометричні розміри елементів дороги: ширина двох смуг проїзної частини  $2 \times 3,75 \text{ м} = 7,5 \text{ м}$ , ширина смуг безпеки  $2 \times 0,5 \text{ м} = 1,0 \text{ м}$ , ширина узбіч  $2 \times 2,0 \text{ м} = 4,0 \text{ м}$ , закладення укосів 1: 1,5, висота насипу 1,0 м і склад активної зони ґрунтів основи представлені на рис. 4.28.

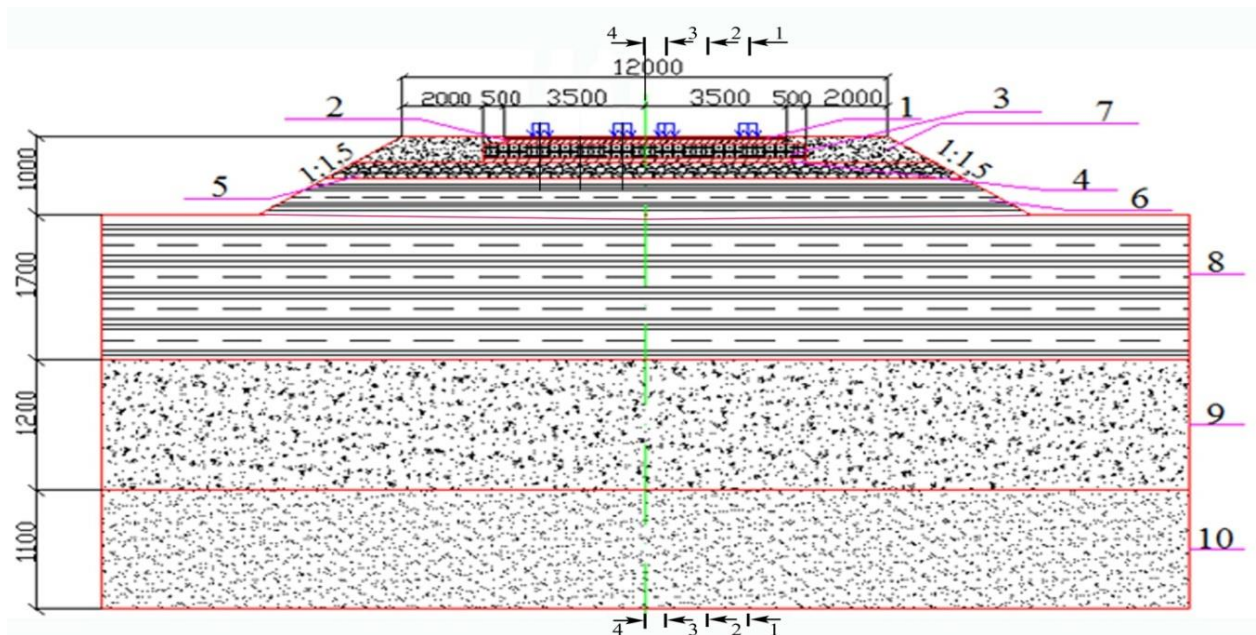
В активній зоні ґрунтової основи товщиною 4 м спостерігаються такі горизонтальні нашарування (рис. 4.28):

- суглинок лесовий, пілуватий, напівтвердий щільний з прошарками водонасиченого піску – 1,7 м (ПГЕ-1 -  $E_0 = 14 \text{ МПа}$ ,  $\nu_0 = 0,28$ ,  $c = 0,026 \text{ МПа}$ ,  $\varphi = 19^\circ$ ,  $\rho = 1740 \text{ кг/м}^3$ );
- супісок пілуватий, жовто-сірий, пластичний; глина жорстка, жирна, кон-

систенція від напівтвердої до твердої – 1,2 м (ІГЕ-2 -  $E_0 = 18$  МПа,  $\nu_0 = 0,2$ ,  $c = 0,024$  МПа,  $\varphi = 19^\circ$ ,  $\rho = 1890$  кг/м<sup>3</sup>);

- пісок дрібний, малого ступеню водонасичення, рихлий, з прошарками піску пилюватого – 1,1 м (ІГЕ-3 -  $E_0 = 18$  МПа,  $\nu_0 = 0,25$ ,  $c = 0,004$  МПа,  $\varphi = 28^\circ$ ,  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>);

- суглинок лесовий, пилюватий, напівтвердий щільний з прошарками водонасиченого піску – 1,7 м (ІГЕ-1 -  $E_0 = 14$  МПа,  $\nu_0 = 0,28$ ,  $c = 0,026$  МПа,  $\varphi = 19^\circ$ ,  $\rho = 1740$  кг/м<sup>3</sup>).



1 – щільний асфальтобетон дрібнозернистий,  $h=5$  см; 2 – крупнозернистий асфальтобетон,  $h=6$  см; 3 – ресайклірована органо-мінеральна суміш,  $h=23$  см; 4 – щебінь,  $h=6$  см; 5 – відсів,  $h=20$  см; 6 – суглинок легкий, пилюватий; 7 – піщано-гравійна суміш (обочина),  $h=40$  см; 8 – суглинок легкий, пилюватий (основа),  $h=170$  см; 9 – супісок пилюватий, жовто-сірий, пластичний,  $h=120$  см; 10 – пісок дрібний, рихлий,  $h=110$  см

Рис. 4.28. Поперечний профіль ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель з активною зоною ґрунтової основи

Математичну модель для фізичної нелінійності побудовано на основі розширеного принципу Мізеса з урахуванням критерію Кулона – Мора [71, 77, 78].

На кожному етапі моделювання виконувався аналіз і оцінка міцності, не-

сучої здатності та деформативності кожного елемента моделі і всієї системи в цілому.

Визначення впливу розвитку пластичних деформацій в ґрунтовій основі дорожнього одягу в процесі нормативного терміну експлуатації, тобто в процесі фільтраційної консолідації, розглянемо на прикладі взаємодії нежорсткого покриття з колесами автотранспорту. У разі виникнення в багатошаровому неоднорідному півпросторі пружнопластичних деформацій різницю за внутрішніми зусиллями (напруженнями і максимальними деформаціями) будемо вважати за значення пластичних деформацій, асимптотично наближених до повних після закінчення часу, визначеного терміном експлуатації.

Розрахунок виконувався для нормативного навантаження на вісь розрахункового автомобіля  $Q = 120$  кН, тиску  $p = 0,60$  МПа, при діаметрі та площі круга, рівновеликого площі відбитку колеса розрахункового автомобіля.

З урахуванням приведення прямокутного рівномірно розподіленого навантаження по квадрату до смугового шириною  $b = 34$  см уточнюємо інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження квадратного колісного відбитка з тиском  $p_a = 0,6$  МПа, для чого будуємо табл. 4.8, використовуючи дані в [144].

За даними табл. 4.8 визначаємо усереднений коефіцієнт:

$$k_p^{\text{cp}} = \frac{\frac{0,898}{0,96} + \frac{0,696}{0,82} + \frac{0,386}{0,55} + \frac{0,194}{0,40} + \frac{0,114}{0,31} + \frac{0,058}{0,21} + \frac{0,008}{0,13}}{6} \approx 0,35.$$

Тоді значення інтенсивності смугового навантаження буде наступне:

$$q = k_p^{\text{cp}} P_a = 0,35 \cdot 0,6 = 0,21 \text{ МПа.}$$

Використовуючи значення фізико-механічних характеристик інженерно-геологічних елементів активної зони ґрунтової основи, будуємо плоску дискретну модель одиничного півпростору. На рис. 4.29 представлена розрахункова схема плоскої задачі визначення НДС дорожнього одягу при його взаємодії з активною зоною ґрунтового півпростору глибиною 4 м, що

складається з трьох неоднорідних шарів, характеристики яких вказані на рисунку.

Таблиця 4.8

Визначення коефіцієнта зменшення інтенсивності смугового навантаження

$z/b$	$k_o$		$k_p = k_o^1 / k_o^\infty$	$k_p^{cp}$
	$l/b = 1$	$l/b = \infty$		
0,25	0,898	0,96	0,935	0,35
0,5	0,696	0,82	0,849	
1,0	0,386	0,55	0,702	
1,5	0,194	0,40	0,485	
2,0	0,114	0,31	0,368	
3,0	0,058	0,21	0,276	
5,0	0,008	0,13	0,061	

Всього товщина активного ґрунтової основи складає:

$$H_c = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 170 + 120 + 110 + 100 = 500 \text{ см.}$$

Розрахункова схема для даної задачі побудована з урахуванням симетрії відносно площини, що проходить через центральну вісь автодороги. Розрахунковий фрагмент півпростору має розміри: 800 см (ширина) і 500 см (глибина - висота), товщина - 1 см (див. рис. 4.29). Розміри регулярної області:  $S_1 = M1 = 2$ ,  $S_2 = M2 = 52$ ,  $S_3 = M3 = 29$ , тобто  $2 \times 52 \times 29$ , що відповідає скінченноелементній моделі (СЕ-моделі) з 1508 СЕ, числу вузлів СЕ-моделі 3016 та кількості розв'язувальних рівнянь  $k = 9048$  без урахування накладених в'язів.

Граничні умови розрахункової схеми такі:

- за площиною симетрії, яка відповідає координатній площині  $OZ^1Z^3$ , накладаються в'язі на переміщення і кути повороту у напрямі  $Z^2$ ;
- нижня межа півпростору моделює границю активної зони ґрунтової основи у вигляді защемлення – накладаються в'язі на вузлові переміщення у напрямках  $Z^1$ ,  $Z^2$  і  $Z^3$ ;
- по бічній правій грані півпростору моделюється лінія рухомого шарніру в межах початкового і кінцевого вузлів з сітковими координатами  $N_2 = M2$ ,  $N_3 = 1$ ;  $k_2 = M2$ ,  $k_3 = M3$ ;
- верхня межа півпростору - вільний край розрахункового фрагменту.

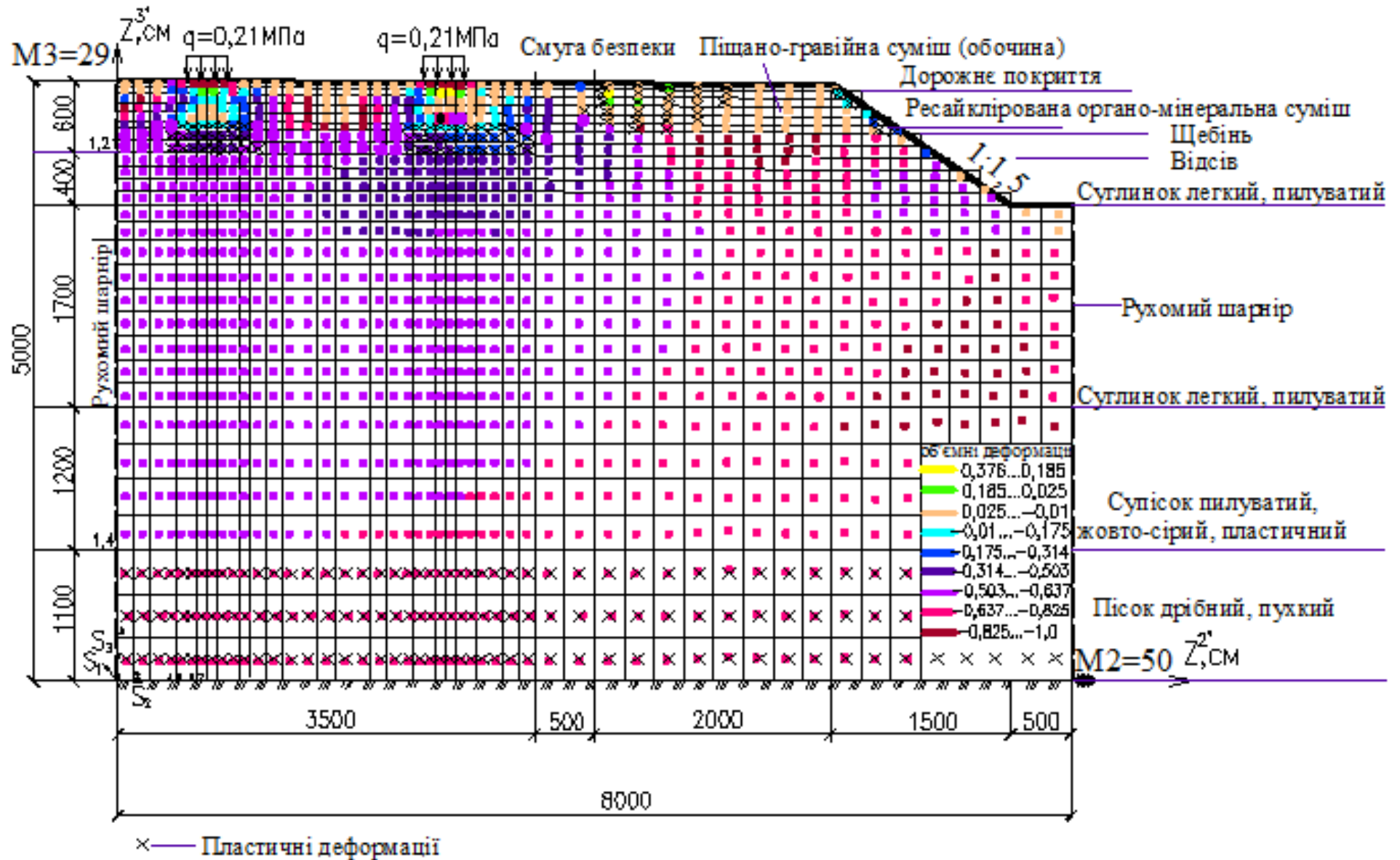


Рис. 4.29. Схема зон деформованого стану дорожньої конструкції і активної зони ґрунту

Густота сітки розбивки розрахункової області на скінченні елементи прийнята з урахуванням конструктивних особливостей дорожнього одягу, умов його роботи під дією навантаження від транспорту і прийнятих в розрахунках МСЕ критеріїв якості [52]. Не останнє місце в обґрунтуванні розмірів і густоти сітки розбивки займає час розв'язання прикладної задачі.

Смугове рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю 0,21 МПа прикладається на верхній кромці півпростору по смугам накату на вузлових інтервалах з сітковими координатами  $S_2 = 6...10$ ,  $S_3 = 29$ ;  $S_2 = 23...27$ ,  $S_3 = 29$ . Горизонтальні однорідні ізотропні шари (для кожного окремо взятого шару), що визначають неоднорідність півпростору, моделюються відповідно оболонковою областю з граничними вузлами – початковим  $N_2 = 1$ ,  $N_3 = 1$  і кінцевим  $k_2 = 52$ ,  $k_3 = 4$  – та включеннями типу 1 – 8, у тому числі дорожнім одягом і еквівалентним шаром дорожнього покриття.

Топологічні параметри областей включень наступні: сіткові координати початкових вузлів –  $S_2^N, S_3^N$  і кінцевих –  $S_2^k, S_3^k$ :

- 1)  $N_2^1 = 1$ ;  $N_3^1 = 4$ ;  $k_2^1 = 52$ ;  $k_3^1 = 8$ ;
- 2)  $N_2^2 = 1$ ;  $N_3^2 = 8$ ;  $k_2^2 = 52$ ;  $k_3^2 = 15$ ;
- 3)  $N_2^3 = 1$ ;  $N_3^3 = 15$ ;  $k_2^3 = 52$ ;  $k_3^3 = 17$ ;
- 4)  $N_2^4 = 1$ ;  $N_3^4 = 17$ ;  $k_2^4 = 52$ ;  $k_3^4 = 21$ ;
- 5)  $N_2^5 = 1$ ;  $N_3^5 = 21$ ;  $k_2^5 = 52$ ;  $k_3^5 = 23$ ;
- 6)  $N_2^5 = 1$ ;  $N_3^5 = 23$ ;  $k_2^5 = 52$ ;  $k_3^5 = 24$ ;
- 7)  $N_2^5 = 1$ ;  $N_3^5 = 24$ ;  $k_2^5 = 52$ ;  $k_3^5 = 27$ ;
- 8)  $N_2^5 = 1$ ;  $N_3^5 = 27$ ;  $k_2^5 = 52$ ;  $k_3^5 = 29$ .

Поверхнєве навантаження від транспорту прикладалося по закону циклів навантаження-розвантаження.

За результатами розрахунків виконувався аналіз процесу зміни НДС матеріалів конструкції автомобільної дороги у околі осей найбільш значимих розрізів 1-1, 2-2, 3-3 і 4-4, що проходять відповідно: за віссю правої смуги накату, посередині між смугами накату, за віссю лівої смуги накату і за централь-



ною віссю автодороги.

Нижня частина верхнього шару щільного асфальтобетону під місцем прикладання навантаження (розріз 1-1) розтягується зі стисненням, при цьому деформації змінюються лінійно. Аналогічно змінюється нижня частина другого шару покриття з крупнозернистого асфальтобетону.

Верхня частина шару з ресайклірованої суміші при прикладанні навантаження від транспорту також розтягується зі стисненням, але складніше, що супроводжується деформаціями із зсувами. Середня частина шару ресайклінгу спочатку відчуває зростання напруження, а затим розвантаження по  $\sigma$  і навантаження по девіатору  $\sigma_i$ , при цьому деформації також відбуваються лінійно.

Всі шари основи дорожнього одягу знаходяться в граничному стані, а шар щебеню відчуває коливання напружень – розрихлюється.

У розрізі 2-2 щільний асфальтобетон спочатку працює на пружній стиск до 9 ітерації, після чого відбувається розтяг. Об'ємні деформації лінійні і зворотні, девіаторні деформації нелінійні і мають більш складний вид. Пористий асфальтобетон працює пружньо на стиск (до 5 ітерації деформації відбуваються лінійно і зворотно). Шари ресайклінгу, щебеню та відсіву працюють аналогічно.

Розріз 4-4: щільний асфальтобетон навантажується на стиск, деформації об'єму відбуваються лінійно, в шарі пористого асфальтобетону відбуваються аналогічні процеси. У шарі ресайклінгу спостерігається незначні нелінійні деформації об'єму.

Вид НДС в конструктивних елементах дорожнього одягу і земляного полотна при навантаженнях від автотранспорту показано на рис. 4.29. В асфальтобетонах, під місцями прикладання навантаження від автомобілів (під пневматиками) спостерігається неоднорідний НДС. Безпосередньо під навантаженням спостерігається одновісний стиск, всередині якого знаходиться зона близька до розтягування, а ще нижче, в нижній частині шару з

ресайклірованої органо-мінеральної суміші, спостерігається розтягнення зсувом.

У шарах щебеню і відсіву, а також в матеріалі земляного полотна, в цілому спостерігаються складні види деформованого стану.

Між смугами навантаження, в шарі щебеню спостерігаються зони дограничного стану у вигляді чистого зсуву.

У нижній частині регенованого шару під місцями прикладення навантаження від транспорту спостерігаються зони з порушеними умовами міцності, де  $\sigma_1 < R_c$  і  $\sigma_3 = 0$ . Такі місця з'явилися на 9-му етапі ітерації і розташовуються під крайньою (до обочини) смугою накату. На рис. 4.30 видно місце порушення умови міцності нижньої ділянки ресайклірованого шару асфальтобетону (позначено □), розташоване під місцем прикладення навантаження. У цьому місці можливе виникнення тріщин.

Також у процесі розрахунків спостерігалися скінченні елементи в яких напружений стан на початку ітерацій був позаграничний, після чого він ставав дограничним. На рис. 4.30 такі місця позначені ○. Для вивчення впливу товщини і положення конструктивних елементів на утворення місць порушення умови міцності були виконані дослідження НДС з різними варіантами конструкції дорожнього одягу (табл. 4.9).

Результати досліджень показали, що в конструкціях № 8, 9, 10 відсутні зони з порушеннями міцності в матеріалах дорожнього одягу.

Шар щебеню в конструкціях дорожнього одягу відіграє суттєву роль, часто спостерігається, що нижні ділянки шару щебеню під місцями прикладання транспортного навантаження переходять в граничний стан.

Встановлений критерій збіжності рішення за напруженнями мав значення  $[\Delta\sigma_{ij}] = 0,01$  МПа.

Отже, матеріали покриття і ґрунт основи працюють в основному в дограничній стадії, а матеріали основи дорожнього одягу під місцем прикладання навантаження і матеріали приповерхневих частин узбіч та укосів працюють в умовах граничного стану.

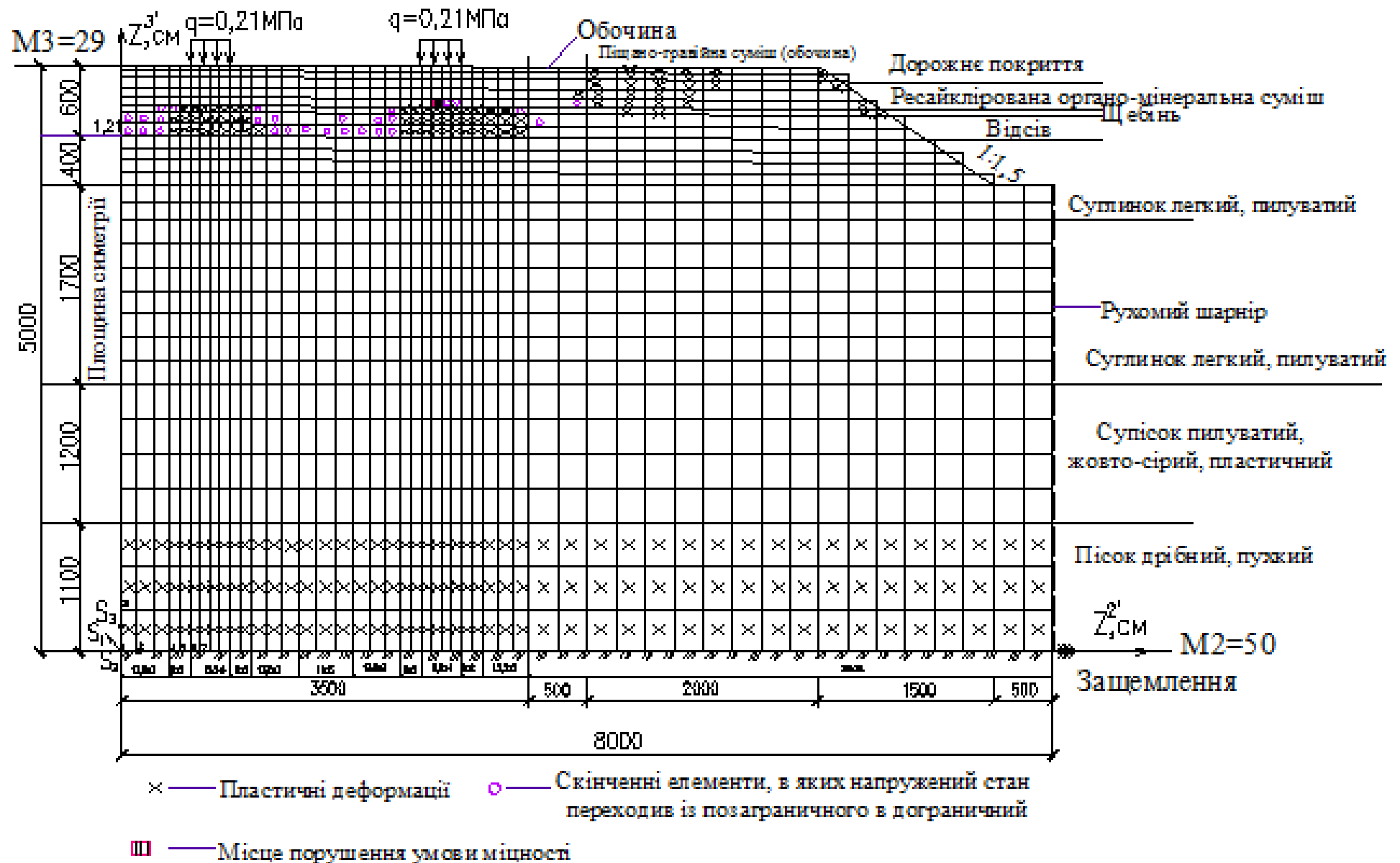


Рис. 4.30. Области розвитку зон пластичних деформацій

Таблиця 4.9

Результати розрахунків на порушення умов міцності у нижній частині ресайкльованого шару асфальтобетону з органо-мінеральної суміші

№ п/п	Назва шару матеріалу	Конструкції дорожнього одягу									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Щільний гарячий асфальтобетон на бітумі, см	5	5	5	11	7	5	5	5	5	5
2	Щільний крупнозернистий гарячий асфальтобетон на бітумі, см	6	6	6	-	-	-	10	10	6	6
3	Ресайкльована органо-мінеральна суміш, см	21	21	23	21	25	27	19	19	21	21
4	Щебінь, см	6	10	6	6	6	6	6	20	38	18
5	Відсів, см	20	16	18	20	20	20	20	16	-	20
6	Наявність СЕ з порушенням умов міцності	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-

#### 4.4 Оцінка економічної ефективності

На основі порівняльного аналізу інженерних і чисельних розрахунків НДС було встановлено певний оптимальний варіант структури нежорсткого дорожнього одягу. Це в основному, відноситься до шару, що підлягає ресайклінгу і який являє собою пружну основу під покриття на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – 302+400). Від здатності шару ресайклінгу витримувати змінні в часі навантаження залежить робота всієї конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, а, отже, і транспортно-економічні показники дороги. Загально відомо, що руйнування покриття погіршує швидкісний режим автотранспорту, зменшує інтенсивність руху, призводить до значних матеріальних збитків, виникнення ДТП і т.д. Таким чином, ефективність експлуатації автомобільної дороги необхідно розглядати з таких її складових: будівельні дорожні витрати; транспортні витрати.

Транспортні витрати, в основному, стосуються фізичного стану транспортних засобів, збільшення їх кількості, обсягів ремонтних робіт, терміну перебування в дорозі, технічних характеристик автомобілів в залежності від виду палива, яке використовується, вантажопідйомності і т.д.

Стосовно будівельних витрат, то наведені в роботі розрахунки і рекомендації мають до них безпосереднє відношення, оскільки мова іде про структуру дорожнього одягу і збільшення терміну експлуатаційної придатності покриття, а, отже, економічної ефективності вкладених коштів.

Дорожні витрати відносяться до поточних витрат, пов'язаних безпосередньо з утриманням покриття в експлуатаційному стані. До них належать: поточні ремонти покриття, заходи з художньо-архітектурного облаштування доріг, санітарного стану смуги відведення, роботи по укріпленню узбіч і земляного полотна полотна.

Для влаштування дорожнього одягу задіяні значні трудові і матеріальні ресурси, машини, механізми, готові вироби і конструкції. Крім того, під час проведення робіт відбувається втручання в гідро- і екосистеми навколишнього середовища, тимчасове, а іноді і постійне відчуження продуктивних сільськогосподарських земель, порушується режим життєдіяльності окремих поселень. Тому під час виконання робіт і усунення негативних наслідків створюються додаткові заходи, які потребують певних витрат.

Отже, вартість влаштування ресайклірованої органо-мінеральної суміші як готової будівельної продукції можна визначити за формулою:

$$C_{осн.} = C_{б.р.} + C_y + C_{м.у.} + C_{i.в.}, \quad (4.11)$$

де  $C_{б.р.}$  – вартість будівельних робіт (ресайклінг, підготовка суміші, вкладання, укочування і т.д.);

$C_y$  – витрати на придбання основного і додаткового технологічного устаткування на інженерне облаштування дороги;

$C_{м.у.}$  – витрати на роботи по монтажу інженерного облаштування дороги;

$C_{i.в.}$  – витрати, пов'язані з виконанням робіт.

Загальна вартість нового покриття після введення в експлуатацію буде становити:

$$K = C_n + D + T, \quad (4.12)$$

де  $D$ ,  $T$  – відповідно дорожні і транспортні витрати.

Якщо покриття влаштовується за технологією холодного ресайклінгу в межах визначеної оптимальної товщини регенованого шару 21 – 26 см, то з формули (4.11) випливає, що показники  $C_y, C_{m.y.}, C_{i.в.}$  будуть практично постійними. Однак  $C_{б.р.}$  буде суттєво залежати від обсягу виконуваних робіт, часу роботи машин і механізмів та вартості виконуваних робіт.

Таким чином, збільшення товщини регенованого шару відповідно підвищить витрати і загальну вартість  $K$ . В даному разі  $C_n$  – це капітальні вкладення. Отже, в залежності від товщини регенованого шару (21 см – 26 см) можемо порівняти капітальні вкладення в той чи інший варіант, тобто:

$$K_{21} < K_{22} < \dots < K_{26}. \quad (4.13)$$

Однак при збільшенні товщини регенованого шару, згідно з дослідженням, покращуються експлуатаційні характеристики покриття: стабілізується активне напруження зсуву, розтягу; є можливість підвищити осьове навантаження автотранспорту, опір прогину, модуль пружності покриття, а головне - підвищити рівень надійності. Зазначені чинники впливають на такі показники як дорожні і транспортні витрати.

Покращення експлуатаційних характеристик покриття дозволяє зменшити дорожні витрати за його доглядом і зменшити міжремонтні строки виконання робіт. З вищенаведеного випливає, що дорожні витрати для кожного з варіантів будуть становити:

$$D_{21} < D_{22} < \dots < D_{26}. \quad (4.14)$$

Між капітальними вкладеннями і дорожніми витратами існує залежність:

$$E = \frac{D_1 - D_2}{K_2 - K_1}, \quad (4.15)$$

де  $D_1, D_2$  – дорожні витрати на утримання покриття в експлуатаційному стані за різними варіантами;

$K_1, K_2$  – капітальні вкладення (інвестиції) в будівництво (реконструкцію, капітальний ремонт) ділянки дороги за різними варіантами;

$E$  – ефективність капітальних вкладень (для дорожньої галузі  $E_n = 0,08$ ).

Для  $E > E_n$  даний варіант є ефективним.

Термін окупності інвестицій можна визначити виходячи із формули:

$$T_0 = \frac{K_2 - K_1}{D_1 - D_2}. \quad (4.16)$$

Якщо  $T_0 < T_n$  – варіант ефективний.

На сьогоднішній день орієнтовна вартість капітального ремонту 1 км дороги II категорії становить 15 млн. грн., а ямкового ремонту – 328 тис. грн. При виконанні холодного ресайклінгу вартість ямкового ремонту, як правило, є на 25 % дешевшою, ніж при капітальному ремонті.

Тобто:  $D_1 = 328000$  грн.;  $D_2 = 0,75 \cdot D_1 = 0,75 \cdot 328000 = 246000$  грн. Згідно з даними, наведеними в статті [154], станом на 2010 рік орієнтовна вартість робіт по ремонту дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу становила 77 грн. на 1 м<sup>2</sup>, а на 1 км дороги – 539 000 грн. (при глибині регенерації 10 см). Вводимо коефіцієнт інфляції  $K_{2012-2016} = 1,795$ . Станом на 2016 р., капітальні витрати при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт за технологією холодного ресайклінгу на 1 060 000 є більшими, ніж при капітальному ремонті дороги:

$$K_2 = 15000000 + 993000 = 15993000 \text{ грн.}$$

Тоді економічна ефективність становить:

$$E = \frac{328000 - 246000}{993000} = 0,083.$$

Термін окупності складає:

$$T = \frac{1}{E} = \frac{1}{0,083} \approx 12 \text{ років.}$$

#### 4.5 Аналітичний розрахунок відновленої дорожньої конструкції на автомобільній дорозі Чугуїв-Великий Бурлук

НДС відновленої конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на автомобільній дорозі Чугуїв-В.Бурлук досліджувався при навантаженні її рівномірно розподіленим навантаженням по всій площі відбитку сліду колеса розрахункового автомобіля групи «А». Діаметр відбитку – 0,37 м, розрахунковий тиск – 0,6 МПа. Автомобільна дорога належить до IV категорії. Розрахункове навантаження на вісь складає 100 кН.

Конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу, а також дані про шари наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Дані шарів конструкції дорожнього одягу та їх характеристики

Найменування матеріалу шару	Початкова (мінімальна) товщина, см	Максимальна товщина, см	Модуль пружності на розтяг, МПа	Модуль пружності розрахунковий, МПа	Модуль пружності на зсув, МПа	Питоме зчеплення $c$ , МПа	Кут внутрішнього тертя, $\varphi$ град
Щільний гарячий асфальтобетон на бітумі БНД 60/90	5	-	4500	3200	1800	-	-
Бетон із холодної суміші на основі фрезерованого асфальтобетону	7	40	3400	2040	1450	-	-
Щебінь марки 100-1400, влаштований способом просочування	10	-	-	600	-	-	-
Грунт робочого шару – суглинок важкий	-	-	-	46,8	-	0,01	6,52



Розрахунок відновленого дорожнього одягу за допустимим пружним прогином виконувався пошарово, починаючи із верхнього підстильного шару. При цьому використовувались номограми [1]:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \frac{E_n}{E_e} &= \frac{E_4}{E_3} = \frac{46,8}{600} = 0,078; \quad \frac{h_3}{D_e} = \frac{10}{37} = 0,27027; \quad \frac{E_{3\text{заг}}}{E_3} = 0,13; \quad E_{3\text{заг}} = 0,13 \cdot E_3 = 78 \text{ МПа.} \\
 2) \quad \frac{E_n}{E_e} &= \frac{E_{3\text{заг}}}{E_2} = \frac{78}{2040} = 0,0382; \quad \frac{h_2}{D_e} = \frac{7}{37} = 0,1891; \quad \frac{E_{2\text{заг}}}{E_2} = 0,055; \quad E_{2\text{заг}} = 0,055 \cdot E_2 = 112,2 \text{ МПа.} \\
 3) \quad \frac{E_n}{E_e} &= \frac{E_{2\text{заг}}}{E_1} = \frac{112,2}{3200} = 0,035; \quad \frac{h_1}{D_e} = \frac{5}{37} = 0,13513; \quad \frac{E_{\text{заг}}}{E_1} = 0,041; \quad E_{\text{заг}} = 0,041 \cdot E_1 = 131,2 \text{ МПа.}
 \end{aligned}$$

Потрібний модуль пружності визначається за формулою [1]:

$$E_{\text{номр.}} = 42,843 \cdot \ln \left| \sum N_p \right| - 350,21. \quad (4.17)$$

де  $\sum N_p$  – сумарна кількість проїздів розрахункового навантаження за строк служби дорожнього одягу [1]:

$$\sum N_p = 0,7 \cdot N_p \frac{K_c}{q^{T_{\text{сл}}-1}} \cdot T_{\text{рдр}} \cdot K_n. \quad (4.18)$$

де  $N_p$  – середньодобова інтенсивність руху в обох напрямках автомобілів в перший рік служби;

$T_{\text{рдр}}$  – кількість розрахункових діб за рік відповідно до стану деформативності конструкції (згідно із [1]  $T_{\text{рдр}} = 135$ );

$K_n$  – коефіцієнт, що враховує відхилення ймовірність відхилення сумарного руху від середнього, що очікується (згідно із [1]  $K_n = 1,26$ );

$K_c$  – коефіцієнт суми, що визначається за формулою (4.28) [1]:

$$K_c = \frac{q^{T_{\text{сл}}} - 1}{q - 1}; \quad (4.19)$$

$T_{\text{сл}}$  – розрахунковий строк служби [1];

$q$  – показник зміни інтенсивності руху в роках ( $q = 1,04$ ).

Коефіцієнт суми становить:  $K_c = \frac{1,04^{12} - 1}{1,04 - 1} = 15,025$ .

Сумарна кількість проїздів розрахункового навантаження за строк служби дорожнього одягу становить:

$$\sum N_p = 0,7 \cdot 9803 \cdot \frac{15,025}{1,04^{12-1}} \cdot 135 \cdot 1,26 = 11392239.$$

Тоді потрібний модуль пружності дорожньої конструкції складає:

$$E_{нотр} = 42,843 \cdot \ln 11392239 - 350,21 = 345,922 \text{ МПа.}$$

Розрахунковий пружний прогин становить:

$$w_{розр} = \frac{0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,37}{131,2} = 0,001522 \text{ м} = 1,5 \text{ мм.}$$

Допустимий пружний прогин становить:

$$w_{допуст} = \frac{0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,37}{345,922} = 0,00057759 \text{ м} = 0,577 \text{ мм.}$$

З цього можна зробити висновок, що така конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу не задовольняє умові міцності за допустимим пружним прогином. Тому необхідно збільшити товщину шару ресайклінгу до деякої величини і виконати розрахунки відновленої дорожньої конструкції, збільшуючи кожен раз на 1 см товщину шару бетону на основі фрезерованого асфальтобетону. При цьому товщини всіх інших шарів дорожньої конструкції залишаються однаковими. Значення розрахункових пружних прогинів при різній товщині шару бетону на основі фрезерованого асфальтобетону наведені в таблиці 4.11.

На рис. 4.31 наведений графік залежності розрахункового пружного прогину  $w_{розр}$  від товщини шару ресайклінгу  $h$  для ділянки автомобільної дороги Чугуїв-Великий Бурлук. Крива побудована на основі даних, які наведені в таблиці 4.11. При товщині шару ресайклінгу 7 см максимальний пружний прогин складає 1,5 мм, а при товщині 30 см – 0,45 мм. Мінімальна товщина відновленого шару, при якій забезпечується міцність дорожнього одягу за допустимим пружним прогином, становить 23 см. При збільшенні товщини шару ресайклінгу від 7 до 15 см спостерігається найбільш стрімке падіння

максимального вертикального переміщення, а починаючи з 25 см значення прогину стабілізується.

Таблиця 4.11

## Значення розрахункових пружних прогинів

Товщина шару ресайклінгу (шару бетону із фрезерованого асфальтобетону), см	Загальний модуль пружності дорожньої конструкції $E_{заг.}$ , МПа	Розрахунковий пружний прогин $w_{розр.}$ , мм	Відносний прогин $\lambda_d = \frac{w}{D_e}$ , $10^{-3}$	Потрібний модуль пружності дорожньої конструкції $E_{заг.}$ , МПа
7	131,2	1,50	4,054	345,922
8	144,0	1,3875	3,75	
9	144,0	1,3875	3,75	
10	160,0	1,2488	3,375	
11	176,0	1,1352	3,068	
12	196,8	1,0152	2,744	
13	208,0	0,9606	2,596	
14	224,0	0,8919	2,410	
15	249,6	0,8005	2,163	
16	256,0	0,7805	2,109	
17	272,0	0,7346	1,985	
18	284,8	0,7015	1,896	
19	294,4	0,6787	1,834	
20	300,8	0,6643	1,795	
21	330,88	0,6038	1,632	
22	348,8	0,5728	1,548	
23	355,2	0,5625	1,520	
24	364,8	0,5477	1,480	
25	377,6	0,5291	1,430	
26	384,0	0,5203	1,406	
27	416,0	0,4802	1,298	
28	432,0	0,4625	1,250	
29	441,6	0,4524	1,222	
30	448,0	0,4460	1,205	
31	457,6	0,4366	1,180	
32	464,0	0,4301	1,162	
33	480,0	0,4163	1,125	
34	486,4	0,4103	1,109	
35	502,4	0,3977	1,075	
36	508,8	0,3927	1,061	
37	510,4	0,3915	1,058	
38	512,0	0,3901	1,054	
39	518,4	0,3854	1,042	
40	524,8	0,3807	1,029	

Тому за критерієм пружного прогину оптимальна товщина регеновано-

го шару знаходиться в межах від 25 до 30 см.

За опором розтягу при згині верхнього монолітного шару дорожнього одягу розрахунок був виконаний на дію навантаження, яке дорівнює 100 кН.

Результати розрахунку дорожньої конструкції за критерієм опору розтягу при згині при різних значеннях товщини шару бетону із фрезерованого асфальтобетону наведені в таблиці 4.12.

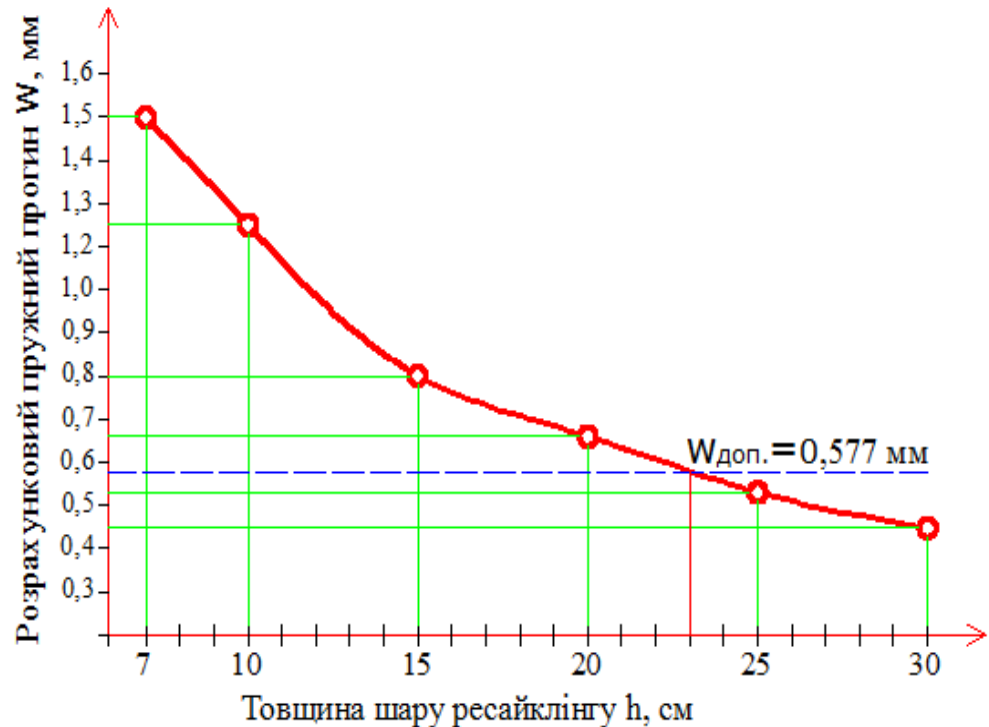


Рис. 4.31 Графік залежності розрахункового пружного прогину від товщини шару бетону з холодних сумішей на основі фрезерованого асфальтобетону

Таблиця 4.12

Результати розрахунку дорожнього одягу нежорсткого типу за критерієм опору розтягу при згині на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-Великий Бурлук

Товщина шару бетону із фрезерованого асфальтобетону h, см	Розрахункове напруження розтягу при згині у верхньому монолітному шарі асфальтобетону G, МПа
7	2,046
10	1,516
15	1,067
20	0,676
25	0,587
30	0,520

На рис. 4.32 наведений графік залежності розрахункового напруження розтягу при згині розтягу при згині  $G$  від товщини шару бетону із фрезерованого асфальтобетону.

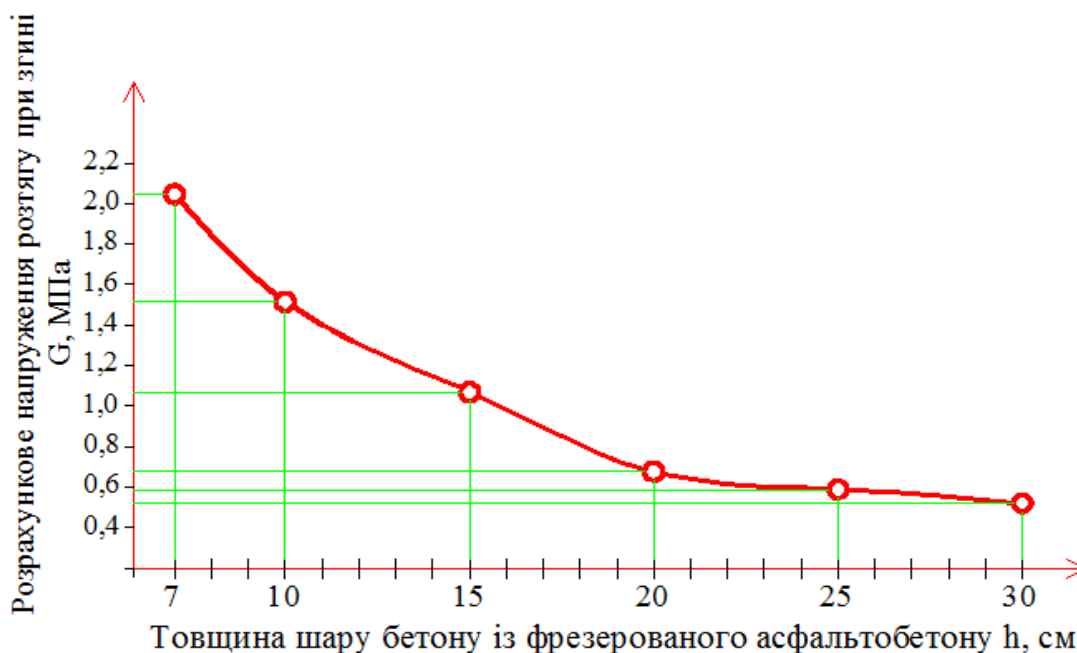


Рис. 4.32 Графік залежності розрахункового напруження розтягу при згині від товщини шару бетону із фрезерованого асфальтобетону

З кривої, наведеного на рис 4.32, можна зробити висновок, що активне напруження розтягу при згині значною мірою залежить від товщини шару бетону із фрезерованого асфальтобетону. В даному випадку мають місце дві ділянки.

В точці, яка відповідає товщині шару регенерації 20 см, відбувається перегин графіку. Подальше збільшення товщини шару бетону із фрезерованого асфальтобетону практично не призводить до зменшення розрахункового напруження розтягу при згині у верхньому монолітному шарі дорожнього одягу. Тому за даним критерієм оптимальна товщина шару ресайклінгу становить 20 см.

По ділянці автомобільної дороги Чугуїв - Великий Бурлук рухаються автомобілі з нормативним навантаженням на вісь, що перевищує 100 кН. Один з таких автомобілів є Мерседес-Бенц 2632+напівпричеп Кайзер. Розстановка коліс даного автомобіля в поздовжньому та поперечному напрямку, а також

розрахункові навантаження на осі та колеса наведено в додатку В (рис. В5). Мерседес-Бенц 2632+напівпричеп Кайзер має шість осей. Найбільші напруження та деформації виникають під заднім візком автопоїзда, який складається з трьох осей із навантаженням 88 кН на кожну. Відповідно, навантаження на задній візок автопоїзда становить 264 кН. В даному випадку при призначенні оптимальної товщини шару ресайклінгу потребується виконати додатковий аналіз НДС з використанням чисельних методів, що і було реалізовано в п. 4.6 даної роботи.

#### **4.6 Чисельне дослідження НДС та підбір оптимальної товщини шару ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-Великий Бурлук**

З метою дослідження НДС реальної багатошарової конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-Великий Бурлук і уточнення оптимальної товщини відновленого шару був виконаний масштабний чисельний експеримент з використанням MSCЕ і програмного комплексу ARDO. Чисельний розрахунок виконувався на дію навантаження від автотранспортного засобу Мерседес-Бенц 2632+напівпричеп Кайзер (додаток В, рис. В 5). Розрахункова схема плити при дії колісного навантаження від автотранспортного засобу наведена на рис. 4.33.

Розміри півпростору в плані становлять 15x5 м. Сіткова область має розміри в плані 42x19x1 (рис.4.33). Чисельний експеримент виконувався для нежорсткого дорожнього одягу, дані про шари якого наведені в таблиці 4.10. В додатку Г (табл.Г1 – Г10) наведені результати чисельних експериментів по дослідженню НДС відновленої дорожньої конструкції при зміні товщини регенованого шару від 7 до 40 см. Визначення НДС проводилось при температурі 20 °С та значенню коефіцієнта постелі 41300 кН/м<sup>2</sup>. Результати розрахунку НДС відновленої конструкції нежорсткого дорожнього одягу при товщині шару ресайклінгу 7 см наведені в табл. 4.13.

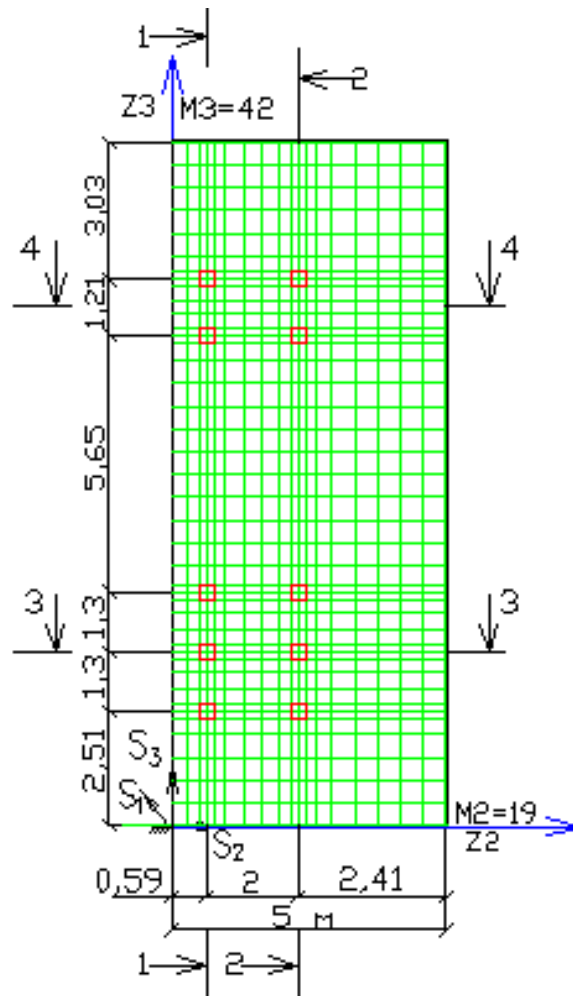


Рис. 4.33 Розрахункова схема та скінченно-елементна модель конструкції дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв – В.Бурлук

Розрахунок НДС дорожнього одягу проводився при різних комбінаціях цементу і бітумної емульсії у складі шару АГБ, що супроводжувалось зміною модуля пружності шару бетону із фрезерованого асфальтобетону  $E_2$ .

За результатами отриманих значень компонентів НДС півпростору, наведених у таблиці 4.13, можна зробити висновок, що як максимальні, так і мінімальні переміщення верхнього шару покриття по напрямку глобальної системи координат  $Z1$  лише незначною мірою реагують на зміну складу комбінованого в'язучого і відповідно модуля пружності  $E_2$ . Це стосується як переміщень, так і напружень. Мінімальні переміщення спостерігаються у вузлі 3,3 скінченно-елементної моделі і становлять  $-1,37$  мм, а максимальні – у вузлі 12,23 ( $u_{1 \max}=0,1$  мм).

Результати розрахунку НДС відновленої конструкції нежорсткого дорожнього одягу при товщині шару ресайклінгу 7 см

№	Склад комбінованого в'язучого, %		Модуль пружності бетону із фрезерованого асфальтобетону $E_2$ , МПа	Переміщення $u_1$ , мм		Реактивний опір ґрунту $R^1$ , кПа		Напруження на верхній площадці, $\tau^{23}$ , МПа	
	цемент	бітумна емульсія		min	max	min	max	min	max
1	7	2	1755	-1,37	0,1	4,3	57,6	-1,03	0,249
2	7	3	1620	-1,37	0,1	4,0	57,7	-1,03	0,250
3	6	2	1552	-1,37	0,1	4,1	57,7	-1,03	0,251
4	7	4	1485	-1,37	0,1	4,1	57,7	-1,03	0,252
5	6	3	1418	-1,37	0,1	4,3	57,5	-1,03	0,251
6	7	5	1350	-1,37	0,1	4,2	57,6	-1,03	0,251
7	5	2	1300	-1,37	0,1	4,2	57,6	-1,03	0,252
8	6	4	1283	-1,37	0,1	4,2	57,6	-1,03	0,252
9	5	3	1215	-1,37	0,1	4,3	57,6	-1,03	0,252
10	4	2	1148	-1,37	0,1	4,3	57,5	-1,03	0,252
11	5	4	1080	-1,37	0,1	4,3	57,5	-1,03	0,252
12	4	3	1013	-1,37	0,1	4,3	57,5	-1,02	0,253
13	3	2	945	-1,37	0,1	4,3	57,6	-1,02	0,253
14	4	4	878	-1,37	0,1	4,3	57,7	-1,02	0,254
15	3	3	810	-1,38	0,1	4,3	57,9	-1,02	0,254
16	4	5	743	-1,38	0,1	4,3	58,2	-1,02	0,254
17	3	4	675	-1,38	0,1	4,3	58,2	-1,01	0,255
18	3	5	540	-1,39	0,1	4,3	58,5	-1,01	0,255

Зі зменшенням модуля пружності бетону із фрезерованого асфальтобетону від 1755 МПа до 540 МПа мінімальне вертикальне переміщення по напрямку Z1 збільшується від 1,37 до 1,39 мм. Це саме можна сказати і про дотичні напруження на верхній площадці, які знижуються також незначною мірою (від 0,103 МПа до 0,101 МПа).

Реактивний опір ґрунту  $R^1$  також майже не реагує на вміст комбінованого в'язучого у складі фрезерованого асфальтобетону. Максимальне значення реакцій ґрунту становить 58,5 кПа при модулі пружності шару бетону із фрезерованого асфальтобетону 545 МПа.

Результати дослідження НДС нежорсткого дорожнього одягу при товщині регенованого шару, що змінюється від 17 до 40 см переважно з



кроком 2 см, наведені в табличному вигляді у додатку Г. Проаналізувавши значення цих величин, можна зробити висновок, що компоненти НДС півпростору слабо реагують на зміну складу комбінованого в'язучого при різних товщинах регенованого шару.

При значенні модуля пружності  $E_2=1620$  МПа, мінімальні дотичні напруження зі збільшенням товщини шару ресайклінгу від 7 до 40 см зменшуються за абсолютним значенням від 1,04 МПа до 0,29 МПа.

На графіку, зображеному на рис. 4.34, чітко спостерігається дві оптимальні точки:

- точка максимуму, яка відповідає товщині шару ресайклінгу 7 см;
- точка мінімуму при товщині шару 40 см.

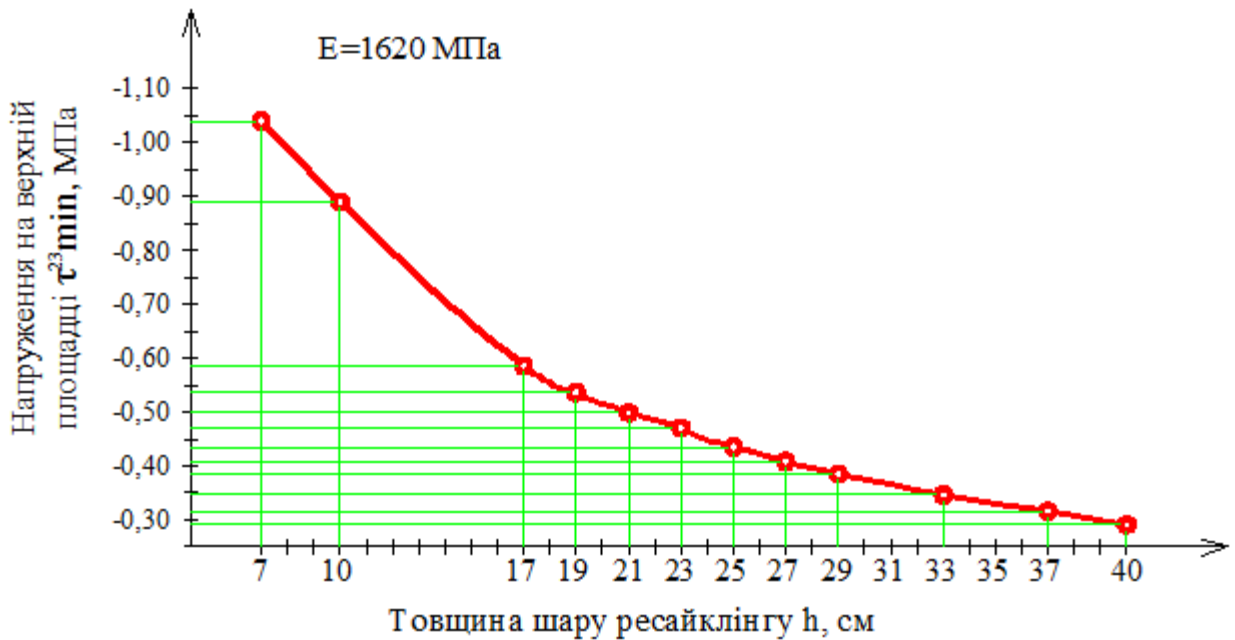


Рис. 4.34 Графік залежності мінімального дотичного напруження на верхній площадці  $\tau^{23}$  від товщини шару ресайклінгу  $h$  при значенні модуля пружності  $E_2=1620$  МПа

Менш чутливими до зміни товщини шару ресайклінгу є вертикальні переміщення і реакції ґрунтової основи по напрямку  $Z_1$  глобальної системи координат. Максимальні за абсолютним значенням вертикальні переміщення у верхньому шарі асфальтобетонного покриття коливаються в діапазоні 1,32 – 1,4

мм при різних значеннях модуля пружності. На рис.4.35 наведений графік залежності максимального вертикального переміщення  $u_{1 \max}$  від товщини шару ресайклінгу  $h$  при значенні модуля пружності  $E_2=1755$  МПа. З кривої, наведеної на рис. 4.35, видно, що вертикальні переміщення зменшуються від 1,37 до 1,32 мм.



Рис. 4.35 Графік залежності максимального за абсолютним значенням вертикального переміщення  $u_{1 \max}$  від товщини шару бетону із холодних сумішей на основі фрезерованого асфальтобетону

Так само можна сказати і про реакцію ґрунтової основи за напрямком  $Z_1$  глобальної системи координат  $R^1$  (рис.4.36). Зі збільшенням товщини шару ресайклінгу від 7 до 19 см реакція ґрунтової основи збільшується лише незначним чином (від 57,5 до 57,6 кПа). Далі відбувається спад реакції ґрунтової основи від 57,6 кПа при товщині регеноерованого шару 19 см до 55,7 кПа при товщині 40 см.

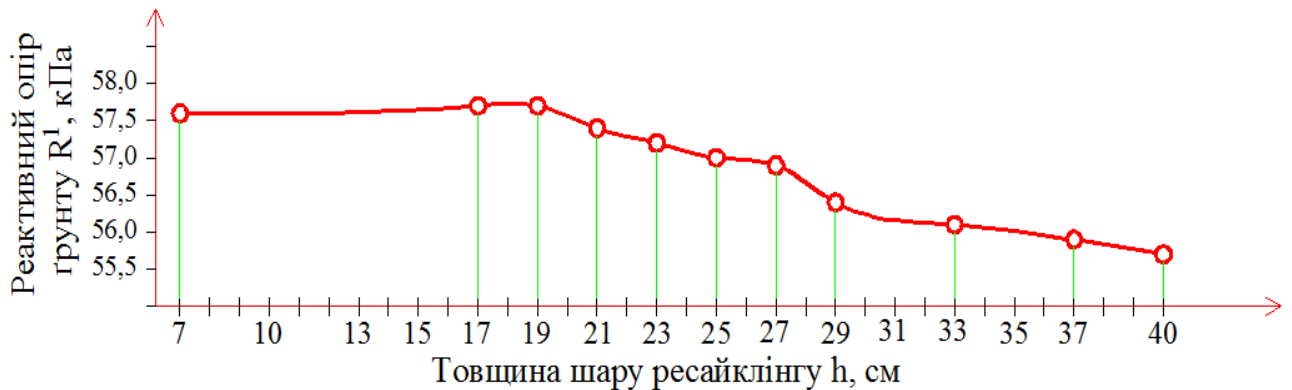


Рис. 4.36 Графік залежності реактивного опору ґрунту  $R^1$  від товщини шару ресайклінгу

За критерієм реактивного опору ґрунту спостерігається дві оптимальні точки: точка максимуму, яка відповідає товщині шару ресайклінгу 19 см і точка мінімуму, яка відповідає товщині 40 см.

#### **4.7 Оцінка ступеня достовірності результатів моделювання НДС нежорстких дорожніх одягів**

Методом оцінки ступеня достовірності отриманих результатів моделювання є порівняння із загальноновизнаними, апробованими рішеннями НДС шаруватих систем.

Чисельні значення напружень і переміщень від навантаження, рівномірно розподіленого по площі круга, були отримані російським вченим Матуа В.П. [52]. Вчений розробив чисельну методику, алгоритм та програмне забезпечення для виконання уточненого розрахунку нежорстких дорожніх одягів у просторовій постановці. Тому виконані розрахунки цілком коректно порівнювати із рішеннями, отриманими Матуа В.П. Приведені результати розрахунку порівнюються також із результатами інженерного розрахунку (табл. 4.14).

Для отримання порівняльних даних, визначались максимальні значення відносних вертикальних і горизонтальних нормальних та дотичних напружень, які виникають у верхньому шарі асфальтобетонного покриття. Також порівнювались визначені на основі співвідношень МССЕ максимальні вертикальні переміщення  $u^1$  із результатами Матуа В.П. та значеннями пружного прогину  $\omega$ , отриманого за інженерним розрахунком.

Аналіз приведених даних показує, що значення  $\sigma^1$  відрізняються від істинних значень на 8,62 % в меншу сторону, в той час як результати інженерного розрахунку по визначенню даного компоненту НДС можуть відрізнитись на 48,24 % в більшу сторону. Це можна пояснити тим, що розв'язок задачі теорії пружності для ізотропного на півпростору в циліндричних координатах (інженерний розрахунок) не дає можливості

врахувати цілу низку параметрів і факторів, які впливають в процесі експлуатації на конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу (про це йшла мова в п.1.3 дисертаційної роботи).

Таблиця 4.14

Порівняння результатів розрахунків компонентів НДС нежорстких дорожніх одягів за різними методами

Параметри внутрішніх зусиль і деформацій	Методи розрахунку				
	За Матуа	Інженерний розрахунок		Комплекс ARDO	
		Значення параметрів	Погрішність, %	Значення параметрів	Погрішність, %
Максимальне відносне вертикальне нормальне напруження $\frac{\sigma^1}{P}$	1,16	2,241	+48,24	1,06	-8,62
Максимальне відносне горизонтальне нормальне напруження $\frac{\sigma^2}{P}$	2,13	-	-	1,439	-32,44
Максимальний прогин $w$ , мм	-	0,760	-	-	-
Максимальне вертикальне переміщення $u^1$ , мм	1,105	-	-31,22	0,91	-17,64

Також за результатами чисельних експериментів підтвердилось положення відомого вченого-дорожника В.О. Богомолова, який вказував на те, що розрахунки, отримані за методикою, наведеною в нормах [1], дають завищені значення вертикальних нормальних напружень [108].

При порівнянні отриманих результатів вертикальних нормальних напружень із істинними значеннями, отриманими Матуа В.П., встановлено, що вони узгоджуються в межах 9 %, що цілком задовольняється для даного моделювання.

Дещо інша картина спостерігається при порівнянні відносних нормальних горизонтальних напружень. Так, відносні горизонтальні нормальні напруження, отримані за результатами чисельного моделювання у розділі ARDO, відрізняються від значень за Матуа В.П. на 32,44 % в меншу сторону.

Це пояснюється насамперед врахуванням за МССЕ явища «хибного зсуву» шляхом використання шестигранного ізопараметричного скінченного елемента (рис. 2.3) в переміщеннях відносно декартової системи координат.

Максимальне вертикальне переміщення поверхні покриття  $u^1$  (в межах прикладання розрахункового навантаження), отримане в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу ARDO, становить 0,93 мм, що на 17,64 % є меншим від результатів за Матуа В.П.

В свою чергу, максимальний пружний прогин, отриманий за результатами інженерного розрахунку, становить 0,760 мм, що на 31,22 % є меншим від істинних значень. Слід відмітити, що чисельні результати за вертикальними переміщеннями відрізняються від аналітичних в більшу сторону. Причиною цього є неврахування в інженерних розрахунках нелінійної роботи матеріалів елементів конструкцій нежорстких дорожніх одягів, просторового характеру прикладання навантаження та взаємодії дорожнього одягу ґрунтовою основою.

Горизонтальні переміщення, які виникають від розрахункового навантаження, відрізняються від істинних значень на 28 %, що можна пояснити неврахуванням явища «хибного зсуву».

Проаналізувавши результати, які були отримані Матуа В.П., встановлено, що різниця між прогинами під правими колесами, розташованими ближче до кромки проїзної частини, перевищують прогини під лівими колесами на 9,4 % для навантаження групи «А». Кардинально протилежну картину показує розрахунок у програмному комплексі ARDO: під віссю лівих коліс вертикальні переміщення є більшими на 19-20 %.

## 4.8 Висновки за розділом 4

1. За допомогою програми автоматизованого розрахунку дорожніх одягів розв'язано прикладні задачі для двох ділянок автомобільних доріг: Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) та Чугуїв – Великий Бурлук.

2. Виконано розрахунки напружень, переміщень і деформацій нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу з використанням аналітичних та чисельних методів. Так, за результатами чисельного моделювання встановлено, що максимальне переміщення на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) становить: за моментною схемою скінченних елементів – 0,91 мм; за аналітичним методом – 0,76 мм. Моментна схема скінченних елементів висуває більш жорсткіші вимоги до розрахунку дорожнього одягу нежорсткого типу за переміщенням, ніж аналітичні методи. Збільшення товщини шару ресайклінгу від 21 до 26 см на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель призводить до зменшення вертикального переміщення від 0,96 мм до 0,9 мм та горизонтальної компоненти від 0,042 мм до 0,038 мм при однократному проїзді автопоїзда. Максимальні реакції ґрунту земляного полотна дещо зміщені в ліву сторону від центру відбитку лівого колеса середньої осі напівпричепу автопоїзда і досягають величини 38,3 кПа.

Збільшення товщини шару ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги від 21 до 26 см призводить до зменшення реакцій ґрунту від 38,3 до 37,2 кПа. Максимальні значення реакцій ґрунту та вертикальних переміщень спостерігаються під лівим колесом центральної осі напівпричепу автопоїзду і на 17– 20 % є більші, ніж під правим, що можна пояснити впливом навантаження, яке діє на сусідній смузі руху.

Максимальні вертикальні напруження спостерігаються на поверхні покриття і складають 0,722 МПа. Максимальні горизонтальні напруження для ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) становлять 0,95 МПа.

3. Проведено детальне візуальне обстеження ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу, за результатами якого виявлено різні види дефектів, що свідчить про одне: були невірно прийняті проектні рішення по призначенню як товщин шарів покриття, так і основи (ресайкльованої органо-мінеральної суміші), оскільки не в повній мірі враховувався вплив від дії сучасних автопоїздів.

4. Виконано розрахунок накопичення необоротних переміщень на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) після виконання технології холодного ресайклінгу. Виявлено, що матеріали дорожнього одягу відчують по ширині та глибині неоднорідний напружено-деформований стан. Встановлено, що в асфальтобетонах, під місцями прикладання навантаження від автомобілів спостерігається неоднорідний напружено-деформований стан: безпосередньо під навантаженням спостерігається одновісний стиск, всередині якого знаходиться зона, близька до розтягування, а ще нижче, в нижній частині шару з ресайкльованої органо-мінеральної суміші, спостерігається розтягнення зсувом.

5. Для вивчення впливу товщини і положення конструктивних елементів на утворення місць порушення умови міцності досліджено напружено-деформований стан з різними варіантами конструкції дорожнього одягу. Встановлено, що шар щебеню відіграє суттєву роль, оскільки часто спостерігається, що нижні ділянки даного шару під місцями прикладання транспортного навантаження переходять в граничний стан.

6. Виконано оцінку ступеня достовірності результатів моделювання із загально визнаними, апробованими рішеннями напружено-деформованого стану шаруватих систем та результатами інженерного розрахунку. Результати, отримані на основі співвідношень моментної схеми скінченних елементів, показали добру узгоджуваність з еталонними рішеннями.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій в галузі холодного ресайклінгу нежорстких дорожніх одягів показав, що в Україні та світі широко застосовується дана технологія під час виконання ремонту чи реконструкції автомобільної дороги, яка дозволяє найбільш ефективно використовувати матеріал старого дорожнього одягу та мінімально наносити шкоду оточуючому середовищу. Однак при застосуванні даної технології має місце проблема при призначенні товщини регенованого шару, що практично неможливо зробити без визначення напружено-деформованого стану.

В результаті аналізу теоретичного, експериментального та практичного досвіду розрахунку і конструювання нежорстких дорожніх одягів виявлено, що на сьогоднішній день не розроблено універсального рішення по визначенню напружено-деформованого стану шаруватих систем. Розв'язок задачі за діючими нормами не дає можливість врахувати просторовий характер прикладання навантаження від сучасних автомобільних поїздів, фізичну та геометричну нелінійність, а також специфіку поведінки матеріалів шарів.

2. На основі співвідношень моментної схеми скінченних елементів, варіаційного рівняння руху, розширеного принципу Мізеса з урахуванням критерію Кулона-Мора та параметра Лоде-Надаї удосконалені алгоритми та математична модель загального процесу нелінійного деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів при врахуванні граничного стану рівноваги ґрунтового півпростору, а також фізичної та геометричної нелінійності, що дозволило більш точно врахувати пластичні деформації у трьохвимірному просторі деформованого стану суцільного середовища, наявність включень, а також явища «хибного зсуву», який виникає за рахунок зміщення елементарного об'єму як жорсткого цілого при великих переміщеннях. Дана задача була розглянута як еволюційна і була реалізована через ітераційний процес рівноважних станів зі змінними граничними умовами та реологічними властивостями складного деформованого тіла.



3. Для реалізації чисельного алгоритму було розроблено програмне забезпечення шляхом створення розділу автоматизованого розрахунку дорожніх одягів в рамках програмного комплексу автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій, що дає можливість розв'язати задачі чисельного моделювання багатошарового дорожнього одягу. Для перевірки достовірності результатів розрахунку було розв'язано тестово-контрольні задачі розрахунку тонких плит на пружній основі, рішення яких показали добру узгоджуваність з відомими аналітичними рішеннями.

4. Розроблені просторові розрахункові скінченно-елементні моделі та проведений розширений чисельний експеримент і аналіз напружено-деформованого стану відновлених нежорстких дорожніх одягів для двох ділянок автомобільних доріг: Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) та Чугуїв – В. Бурлук. Це надало змогу: встановити ступінь впливу параметрів дорожньої конструкції на її напружено-деформований стан.

5. За допомогою програми автоматизованого розрахунку дорожніх одягів розв'язано прикладні задачі для двох ділянок автомобільних доріг: Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) та Чугуїв – Великий Бурлук. Виконано розрахунок накопичення необоротних переміщень на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) після виконання технології холодного ресайклінгу. Виявлено, що матеріали дорожнього одягу відчують по ширині та глибині неоднорідний напружено-деформований стан. Встановлено, що в асфальтобетонах безпосередньо під навантаженням спостерігається одновісний стиск, всередині якого знаходиться зона, близька до розтягування, а ще нижче, в нижній частині шару з ресайклірованої органо-мінеральної суміші, спостерігається розтягнення зсувом. Для вивчення впливу товщини і положення конструктивних елементів на утворення місць порушення умови міцності досліджено напружено-деформований стан з різними варіантами конструкції дорожнього одягу.

Результати досліджень використано: ТОВ «КИЇВАВІАПРОЕКТ» при розробленні проектної документації по Міжнародному аеропорту «Бориспіль»,

а саме при проведенні аналізу напружено-деформованого стану під'їзної дороги та водовідвідних інженерних комунікацій термінального комплексу "D" з використанням програмного комплексу автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій; Українським державним інститутом по проектуванню об'єктів дорожнього господарства «Укрдіпродор» при дослідженні напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400); Національним авіаційним університетом при викладанні курсу «Будівельна механіка (спецкурс)».

## Література

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3 – 218 – 186 – 2004. – К.: Укравтодор, 2004. – 176 с.
2. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво: ДБН В.2.3 – 4: 2015. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 104 с.
3. Холодный ресайклинг. Руководство по применению. – Wirtgen GmbH, 2012. – 365 с.
4. Говоруха О.В. Вдосконалення технології регенерації асфальтобетонів для ремонту і реконструкції автомобільних доріг: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.22.11 / Говоруха Олексій Володимирович. – Харків, 2012. – 191 с.
5. Шипицын В.В. Обоснование технологии ремонта асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга с применением медленнотвердеющих минеральных вяжущих и разжиженного битума: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Шипицын Валерий Валерьевич. – Омск, 2006. – 170 с.
6. Филатов Ф.С. Восстановление асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга / Филатов Сергей Федорович. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 72 с.
7. Глуховский И.В. Органоминеральные вяжущие и бетоны контактного твердения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / Глуховский Игорь Викторович. – Киев, 1984. – 232 с.
8. Гезенцвей Л.Б. Активация минеральных материалов – эффективный путь повышения качества асфальтобетона / Гезенцвей Л.Б. // Труды СоюздорНИИ. – 1972. – Вып. 56. – С.8 – 20.
9. Богуславский А.М. Цементасфальтобетон – материал для дорожных и аэродромных покрытий / А.М. Богуславский, Чан Нгок Минь, В.В. Дорган [и др.] // Автомобильные дороги. – 1985. - №4. – С. 14 – 16.

10. Epps I.A. Guidelines For Recycling Pavement Materials / I.A. Epps, D.N. Little, L.J. Holmgreen, R.L. Terrel. – Washington: FHWA, 1980. – 37 p.
11. Бахрах Г.С. Проблемы регенерации асфальтобетонных покрытий / Г.С. Бахрах, Г.С. Горлина // Автомоб. дороги. – 1981. - № 9. – С. 17 – 30.
12. Бахрах Г.С. Регенерация покрытий и дорожных одежд нежесткого типа / Г.С. Бахрах // Наука и техника в дорожн. отрасли. – 1998. - №3. – С.18 – 21.
13. Бахрах Г.С. Холодная регенерация дорожных одежд / Г.С. Бахрах// Повышение безопасности дорожного движения. Унификация требований к асфальтобетону. Дорожные одежды и материалы. Борьба с зимней скользкостью на дорогах. Исследование пространственной работы балочных систем автодорожных мостов: сб. науч. тр. / НПО «РосДорНИИ». – 1994. – Вып. 7. – С. 63 – 74.
14. Бахрах Г.С. Холодная регенерация дорожных одежд нежесткого типа / Г.С. Бахрах // Автомобильные дороги: обзор. информ. / Информавтодор. – 1999. – Вып. 6. – 84 с.
15. Бахрах Г.С. Влияние движения автомобильного транспорта на выносливость свежеложенного асфальтогранулобетонного слоя / Г.С. Бахрах // Дороги и мосты. – 2011. – Вып. 25. – С. 151 – 159.
16. Билай Л.В. Регенерация использованного дорожного асфальтобетона: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.14 / Билай Л.В. – Киев, 1969. – 191 с.
17. Алиев А.М. Новый способ регенерации асфальтобетона: материалы VII Всесоюзного совещания дорожников [«Ускорение научно-технического прогресса, повышение производительности труда и качества дорожных работ»]. – Москва, 1981. – С. 88 – 89.
18. Алиев А.М. Основы регенерации асфальтобетона: материалы Всесоюзной научно-технической конференции [«Теория, производство и применение искусственных строительных конгломератов»]. – г. Владимир, 1982. – С. 13 – 14.

19. Адоряни К. Разработка методов оптимизации состава и технологии приготовления обновленных асфальтобетонных смесей при ремонте покрытий: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.14 / К. Адоряни. – Москва, 1988. – 15 с.
20. Glet W. Kaltbau weisenein neuer Weg der Wiederverwendung und zur Einkapselung kritischer Stoffe / W. Glet // Die Asphaltstrasse. – 1990. - №6. – s.31 –
21. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / Ребиндер П.А. – Москва: Наука, 1979. – 232 с.
22. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны / Рыбьев И.А. – Москва: Высшая школа, 1969. – 396 с.
23. Сюньи Г.К. Регенерированный дорожный асфальтовый бетон / Г.К. Сюньи, К.Х. Усманов, Э.С. Файнберг. – Москва: Транспорт, 1984. – 118 с.
24. Веренько В.А. Дорожные бетоны на органогидравлических вяжущих (теория и практическое применение): дисс. ... доктора техн. наук: 05.23.05 / Веренько Владимир Адольфович. – Минск, 1999. – 389 с.
25. Пахомов В.А. Обоснование применения холодной регенерации при реконструкции асфальтобетонных покрытий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Пахомов Владимир Анатольевич. – Москва, 2002. – 229 с.
26. Будівельні матеріали. Суміші органо-мінеральні дорожні з фрезерованих матеріалів дорожніх одягів, виготовлені за методом холодного ресайклінгу. Технічні умови: СОУ 45.2 – 00018112 – 061 – 2011. – К.: Укравтодор, 2011. – 21 с.
27. Проектування і будівництво основ та покриттів автомобільних доріг із кам'яних матеріалів, промислових відходів і ґрунтів, укріплених цементом: ВБН В.2.3-218-002-95. – К.: Укравтодор, 1995. – 48 с.
28. Головка С.К. Рациональні способи повторного використання асфальтобетону при реконструкції автомобільних доріг: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.22.11 / Головка Сергій Костянтинович. – Київ, 1998. – 203 с.

29. Беспалий Є.А. Удосконалення технології регенерації асфальтобетону на основі фена золи для ремонту і реконструкції автомобільних доріг: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.22.11 / Беспалий Євгеній Аркадійович. – Київ, 2002. – 178 с.
30. Сасько М.Ф. Перваги і недоліки застосування технології холодного реайклінгу/М.Ф. Сасько, І.В. Копинець// Автошляховик України. – 2011. - №1. – С. 33 – 39.
31. Сасько М.Ф. Холодний ресайклінг – сучасна прогресивна технологія відновлення нежорстких дорожніх одягів /М.Ф. Сасько // Автошляховик України. – 2010. - №1. – С. 38 – 41.
32. Говоруха О.В. Улаштування шарів дорожнього одягу із застосуванням фрезерованого асфальтового дрібняку / Жданюк В.К., Говоруха О.В., Гнатів М.Я., Іваниця Ю.П. // Автошляховик України. – 2003. - №2. – С. 30 – 31.
33. Говоруха О.В. Перспективи використання холодних органо-гідравлічних сумішей на основі фрезерованого дрібняку / Жданюк В.К., Говоруха О.В., Гнатів М.Я., Іваниця Ю.П. // Автошляховик України. – 2004. – №2. – С. 37 – 38.
34. Жданюк В.К. Дослідження деформаційних і міцнісних характеристик бетонів на основі фрезерованого асфальтобетону / Жданюк В.К., Говоруха О.В. // Комунальне господарство міст. – Харків, 2012. - №103. – С. 92 – 98.
35. Калёнова Е.В. Совершенствование методики расчёта при проектировании нежестких дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Калёнова Екатерина Валерьевна. – Москва, 2009. – 276 с.
36. Иванов Н.Н. Конструирование и расчёт нежестких дорожных одежд / Н.Н. Иванов. – Москва: Транспорт, 1973. – 328 с.
37. Волокитин В.П. Определение деформационно-прочностных характеристик асфальтобетонных слоев нежестких дорожных одежд: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Волокитин Владимир Павлович. – Воронеж, 2004. – 195 с.

38. Супрун А.С. Расчёт напряжений, перемещений и деформаций нежестких дорожных одежд при движении многоосных многоколёсных транспортных средств: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.22.03 / Супрун Анатолий Сергеевич. – Киев, 1983. – 314 с.
39. Расчёт и испытание нежестких дорожных одежд [Иванов Н.Н., Пузаков Н.А., Барздо В.И., Яковлев Ю.М.]. – Москва: Высшая школа, 1971. – 99 с.
40. Корсунский М.Б. Определение напряжений и перемещений в основании сооружения, создающего на грунт вертикальное равномерное давление по площади круга / Корсунский М.Б. // Основания и фундаменты. – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 5 – 15.
41. Казарновский В.Д. Проблема колееобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием / Казарновский В.Д. // Наука и техника в дорожной отрасли. – Москва: Дороги, 2000. - №2. – С. 3 – 4.
42. Теляев П.И. Исследование напряженного состояния дорожных конструкций при длительном и кратковременном воздействии нагрузок: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук: спец. 05.23.05 / П.И. Теляев. – Ленинград, 1965. – 20 с.
43. Корсунский М.Б. Пути учета фактора времени при расчёте дорожных одежд: материалы к научно-технической конференции по динамическим воздействиям на грунты и одежды автомобильных дорог. – Москва, 1964. – С. 89 – 96.
44. Калужский Я.А. О запасе прочности нежестких дорожных одежд на многократное воздействие нагрузок / Калужский Я.А., Радовский Б.С., Малеванский Г.С. // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – Киев, 1973. – Вып. 12. – С. 11 – 16.
45. Казарновский В.Д. О прогнозе осадок насыпей на торфяных грунтах / Казарновский В.Д., Кузахметова З.К., Чернявская Л.И. // Труды СоюздорНИИ, 1972. – Вып. 60. – С. 36 – 65.
46. Бируля А.К. Конструирование нежестких дорожных одежд автомобильных дорог / А.К. Бируля. – Москва: Транспорт, 1964. – 168 с.

47. Радовский Б.С. О применении расчетной схемы слоистой вязкоупругой среды к оценке напряженно-деформированного состояния дорожных и аэродромных покрытий при подвижной нагрузке / Радовский Б.С. // Прикладная механика. – 1979. – т.15, №10. – С. 50 – 57.
48. Приварников А.К. Поведение дорожной конструкции как слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной загрузки / Приварников А.К., Радовский Б.С. // Известия ВУЗов: строительство и архитектура. – 1975. - №4. – С. 141 – 146.
49. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчёта нежёстких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: автореф. дисс. ... доктора техн. наук: 05.23.05 / Б.С. Радовский. – Москва, 1982. – 35 с.
50. Радовский Б.С. Определение реологических коэффициентов по результатам испытаний дорожно-строительных материалов на ползучесть и релаксацию / Радовский Б.С., Супрун А.С. // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – Киев: Будивельник, 1979. – С. 62 – 68.
51. Кузин Н.В. Учет упруговязкопластических свойств асфальтобетонных покрытий и оснований при проектировании дорожных одежд: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Кузин Николай Владимирович. – Омск, 2008. – 176 с.
52. Матуа В.П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: 05.23.11 / Матуа Вахтанг Парменович. – Ростов-на-Дону, 2002. – 484 с.
53. Матуа В.П. Проектирование дорожных конструкций с учетом накопления их элементов остаточных деформаций: материалы Международной научно-практической конференции. – Москва, МАДИ (ТУ). – 2000. – С. 166– 169.
54. Матуа В.П. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций: материалы Международной научно-технической конференции. – Омск, СибАДИ. – 2000. – С. 107 – 108.



55. Васильев А.П. Причины образования колеи и пути их устранения / А.П. Васильев // Наука и техника в дорожной отрасли. – Москва: Изд-во «Дороги», 1999. - №2. – С. 6 – 9.
56. Васильев А.П. Предложения по учету остаточных деформаций при расчете дорожных одежд нежесткого типа / А.П. Васильев, М.С. Коганзон, Ю.М. Яковлев // Наука и техника в дорожной отрасли. - Москва: Изд-во «Дороги», 1997. - №1. – С. 5 – 6.
57. Плевако В.П. Совершенствование метода расчета нежестких дорожных одежд / В.П. Плевако, В.Н. Ряпухин // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного университета / Харьковский государственный автомобильно-дорожный университет. – Харьков, 1999. – Вып. 9. – С. 51 – 56.
58. Гладкий А.В. Особенности расчетов на прочность многослойных покрытий и усиления нежестких дорожных одежд / А.В. Гладкий, В.Н. Ряпухин // Сборник научных ст. ДерждорНДІ. – Киев, 2006. – Вып. 4. – С. 232 – 247.
59. Онищенко А.М. Заходи з підвищення коліє стійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортних засобів / А.М. Онищенко, М.В. Гаркуша // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Донецьк, 2013. – Вип. 1 (99). – С. 58 – 63.
60. Лугов С.В. Основные положения методики расчета глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук : спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / С.В. Лугов. – Москва, 2004. – 25 с.
61. Чирва Д.В. Влияние упруго-вязко-пластических свойств асфальтобетона на накопление остаточных деформаций при пространственном динамическом нагружении дорожных конструкций: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук : спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / Д.В. Чирва. – Волгоград, 2010. – 22 с.

62. Finn F. The Use of Distress of Pavement Structures: Proceedings Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements University of Michigan. – 1977. – Vol. 1. – P. 3 – 38.
63. Дубик О.М. Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу / О.М. Дубик // Проблеми розвитку міського середовища. – Київ: Національний авіаційний університет, 2014. – Вип. 1 (11). – С. 465 – 474.
64. Дубик О.М. Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу / О.М. Дубик // Міське середовище ХХІ ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн: Міжнародний науково-практичний конгрес, 10 – 14 лютого 2014 р.: тези доповіді. – Київ, 2014. – С. 319 – 320.
65. Арсеньєва Н.О. Удосконалення методу розрахунку нежорстких дорожніх одягів з урахуванням критерію міцності асфальтобетонних шарів на зсув: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.22.11 / Арсеньєва Наталія Олександрівна. – Харків, 2014. – 212 с.
66. Super pave Mix Design. Asphalt Institute Super vespers. – Printing, 1996. – 56 р.
67. Угримов С.В. Однобічний контакт багат шарових конструкцій з пружною основою / Угримов С.В. // Комунальне господарство міст. – Київ: Техніка, 2007. – С. 173 – 177.
68. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация / А.Н. Шупиков, Я.П. Бузько, Н.В. Сметанкина, С.В. Угримов. – Харьков: Изд-во «ИНЖЭК», 2004. – 252 с.
69. Руденский А.В. Применение метода конечных элементов при анализе напряжённо-деформированного состояния асфальтовых материалов в дорожных конструкциях / А.В. Руденский, В.Н. Иванов // Труды ГипродорНИИ. – Москва, 1976. – Вып. 16. – С. 58 – 66.
70. Дубик О.М. Розрахунок на міцність захисних залізобетонних об'ємних безнапірних труб дощових мереж від дії дорожнього покриття і тиску тягача

НК – 80 / О.М. Дубик // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ: Національний транспортний університет, 2013. – Вип. 87. – С. 23 – 28.

71. Talakh S. Computational investigation of composed multilayered half-space strength under pavement / Svetlana Talakh, Oleksandr Dubik // Proceedings of the National Aviation University. – Kyiv: National Aviation University, 2015. - №3 (64). - P. 97 – 104.

72. Белятинський А.О. Нелінійне деформування конструкцій нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу / Белятинський А.О, Талах С.М., Дубик О.М. // Вісник інженерної академії України:зб. Наукових праць. – Київ: НАУ, 2016. –Вип. 3. – С. 232 – 238.

73. Дубик А.Н. Прочностной расчет аэродромных покрытий при слабых грунтовых основаниях / А.Н. Дубик, В. Н. Селенков, С.М. Талах // Proceedings of the 16<sup>th</sup> Conference for Junior Researchers Science – Future of Lithuania. Transport engineering and management. – Vilnius, Lithuania: Technika, 2013. – P. 55 – 59.

74. Дубик О.М. Дослідження впливу параметрів дорожньої конструкції на її напружено-деформований стан під дією розрахункового навантаження / О.М. Дубик, С.М. Талах // Авіа-2015: Міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доповіді. – Київ, 2015. – С. 22.21 – 22.24.

75. Дубик А.Н. Расчёт напряженно-деформированного состояния активного грунтового полупространства под нежесткими дорожными одеждами / А.Н. Дубик, С.М. Талах, А.А. Белятинский // Proceedings of the 18<sup>th</sup> Conference for Junior Researchers Science – Future of Lithuania. Transport engineering and management. – Vilnius, Lithuania: Technika, 2015. – P. 124 – 129.

76. Talakh S. Determination of stress-strain state hard cement constructions airport paving the presence of weak soil layers / S. Talakh, O. Dubik // Proceedings the Seventh World Congress «Aviation in the XXI-st Century. - Kyiv: National Aviation University, 2016. - P. 10.1.31 – 10.1.35.

77. Талах С.М. Моделювання конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу при взаємодії з ґрунтовою основою / С.М. Талах, О.М. Дубик // Проблеми розвитку міського середовища. – Київ: Національний авіаційний університет, 2015. – Вип. 2 (14). – С. 62 – 72.
78. Цыхановский В.К. Расчет тонких плит на упругом основании методом конечных элементов [Текст] / В.К. Цыхановский, С.М. Козловец, А.С. Коряк. – Київ: Сталь, 2008. – 234 с.
79. Радовский Б.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния покрытий автомобильных дорог как слоистого вязкоупругого основания при подвижной нагрузке / Б.С. Радовский // Прикладная механика. – 1980. – Т. 16, №4. – С. 131 – 135.
80. Конорев А.С. Учет динамического воздействия многоосных транспортных средств при расчете дорожных конструкций: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / А.С. Конорев. – Волгоград, 2012. – 23 с.
81. Смирнов А.В. Теоретические и экспериментальные работоспособности нежестких дорожных одежд: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.23.11 / Смирнов Александр Владимирович. – Омск, 1989. – 376 с.
82. Dynamic Vehicle Forces on Pavements: Draft Report / The Pennsylvania Transportation Institute, Federal Highway Administration, 1995. – Steit D.A, Kulakowski A., Wollyung R.J. – DTFH 61 – 90 – C – 00084.
83. Heath A. Heavy Vehicle Design Parameters and Dynamic Pavement Loading / A. Heath, M. Good // Australian Road Research. – 1985. – Vol.15. No. 4. – P. 249 – 263.
84. Амиров А.Т. Совершенствование метода проектирования усиления нежестких дорожных одежд капитального типа с учетом перспективных нагрузок (на примере автомобильной дороги «Астрахань-Махачкала»): автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство

дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / А.Т. Амиров. – Москва, 2012. – 19 с.

85. Иллиополов С.К. Уточненный метод расчета напряженно-деформированного состояния системы «дорожная одежда-грунт» / С.К. Иллиополов, М.Г. Селезнев. – Ростов-на-Дону: МП «Новая книга», 1997. – 142 с.

86. Апестин В.К. Испытание и оценка прочности нежестких дорожных одежд / В.К. Апестин, А.М. Шак, Ю.М. Яковлев. – Москва: Транспорт, 1977. – 102 с.

87. Заворицкий В.И. Справочник по проектированию дорожных одежд / Владимир Иосифович Заворицкий. – Киев: Будивельник. – 1983. – 104 с.

88. Калужский Я.А. Напряжения и деформации дорожных одежд, включающих слои из упруговязких материалов от действия подвижной загрузки: материалы VI Всесоюзного научно-техн. совещания по основн. пробл. техн. прогресса в дор. строительстве. – Москва. – 1971. – С. 20 – 27.

89. Батраков О.Т. Учет кратковременных нагрузок при конструировании и расчете нежестких дорожных одежд: материалы научно-технической конференции по динамическим воздействиям на грунты и одежды автомобильных дорог. – Ленинград: Стройиздат. – 1964. – С. 102 – 107.

90. Васильев А.П. Развитие методов расчета дорожных одежд нежесткого типа / А.П. Васильев, М.С. Коганзон, Ю.М. Яковлев // Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог. Сборник научных трудов. – Москва: МАДИ, 1998. – С. 16 – 19.

91. Monismith C.L. Pavement design: the fatigue subsystem<sup>^</sup> Highway Research board Special Report. – 1973. – №140. – P. 1 – 19.

92. Тулаев А.Я. Проектирование автомобильных дорожных одежд / Александр Яковлевич Тулаев. – Москва: Транспорт, 1977. – 117 с.

93. Медников И.А. Изгиб плиты на упруго-пластичном основании с учетом просадки грунта при действии нагрузки и температуры. Исследования по строительной механике / И.А. Медников // Труды МАДИ, 1979. – 18 с.

94. Методические указания по расчету нежестких дорожных одежд: учебное пособие / [ А.П. Васильев, Ю.М. Яковлев, М.С. Коганзон, В.К. Пашкин]. – Москва-Иркутск: МАДИ (ТУ)-ИРДУЦ, 1998. – 55 с.
95. Каныгина С.Ю. Прогнозирование остаточных деформаций дорожных одежд нежесткого типа на земляном полотне из глинистых грунтов: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / С.Ю. Каныгина. – Москва, 1999. – 20 с.
96. Жустарева Е.В. Влияние плотности связного грунта в рабочем слое земляного полотна на остаточные деформации нежестких дорожных одежд: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / Е.В. Жустарева. – Москва: МАДИ, 2000. – 20 с.
97. Кузло М.Т. Моделювання деформацій ґрунтових масивів при зміні гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.02 «Основи і фундаменти» / М.Т. Кузло. – Київ, 2014. – 34 с.
98. Кузло М.Т. Напружено-деформований стан ґрунтових масивів в умовах фільтраційної консолідації сольових розчинів / М.Т. Кузло // Вісник ОДАБА. – Вип. 48. Ч.1. – Одеса, 2012. – С. 270 – 279.
99. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерні моделі конструкцій. – К.: Факт, 2007. – 384 с.
100. Хвоинский Л.А. Исследование и разработка обеспечения устойчивости дорожных конструкций автомобильных дорог: автореферат диссертации кандидата технических наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / Л.А. Хвоинский. – СибАДИ, 2001. – 17 с.
101. Павленко Н.В. Удосконалення методу розрахунку дорожніх одягів перехідного типу із дискретних та малозв'язних матеріалів: авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» / Н.В. Павленко. – Київ, 2013. – 21 с.

102. Ряпухін В.М. Вибір оптимальної теорії міцності асфальтобетону як термопластичного матеріалу / В.М. Ряпухін, Н.О. Нечитайло // Сборник научных трудов Донбасского гос. Университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2010. – Вып. 33. – С. 284 – 290.
103. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу [Текст]: дис....доктора техн. наук / І.П. Гамеляк. – К: Національний транспортний університет, 2005. – 525 с.
104. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» / І.П. Гамеляк. – К.: Національний транспортний університет, 2005. – 34 с.
105. Ряпухін В.М. Використання критерію міцності Писаренко-Лебедева (2) для оцінки міцності асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів / В.М. Ряпухін, Н.О. Нечитайло // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. – Київ: НТУ, 2012. – Вип. 85. – С. 9-19.
106. Проектирование нежестких дорожных одежд: ОДН 218.046 – 01. – М.: Министерство транспорта РФ, 2001. – 145 с.
107. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов: ТКП 45-3.03.3-2004 [Действующий от 2004-01-01]. – М., 2004. – 169 с.
108. Богомолів В.О. Щодо необхідності розробки нової методики розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу / В.О. Богомолів, В.К. Жданюк, С.В. Богомолів // Автошляховик України [науково-виробничий журнал] / ДП «ДержавтотрансНДІпроект Укравтодор». – Київ: Вид-во «Грета», 2011. – С. 23 – 26.
109. Заворицкий В.И. О расчёте методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния нежестких дорожных одежд / В.И. Заворицкий, А.В. Артёменко // Ускорение науч. – техн. прогресса, повыш. производ. труда и качества дор. работ : материалы 7-го Всесоюзного Совещания дорожников (30 ноября – 3 декабря 1981). – Москва, 1981. – С. 9 – 10.

110. Васильков Г.М. О решении нелинейных динамических задач строительной механики шаговым методом / Г.М.Васильков, Л.Н. Панасюк // Тезисы доклада 5 Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных систем. – Киев: КИСИ, 1985. – С. 44 – 45.
111. Глушков Г.И. Расчет сооружений, заглубленных в грунт / Г.И. Глушков. – Москва: Стройиздат, 1977. – 349 с.
112. Дем'янушко И.В. Методы и средства повышения надежности и долговечности материалов и сооружений на автомобильных дорогах с учетом транспортных воздействий: технический отчет по Межвузовской НТП. - М., 1995. – 77 с. - №Б 670095.
113. Майоров В.И. Описание диаграмм работы асфальтобетонов кусочно-линейными соотношениями / В.И. Майоров // Строительство и архитектура. Строительные конструкции и материалы. – Москва: ВНИИНТПИ, 2000. – Вып 3. – С. 13 – 17.
114. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О.Зенкевич. – Москва: Мир, 1975. – 514 с.
115. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган – Москва: Мир, 1986. – 318 с.
116. Савельев Л.М. Прямое интегрирование уравнений движения в методе конечных элементов / Л.М. Савельев // Прочность и долговечность конструкций летательных аппаратов. – Куйбышев, 1984. – С. 37 – 44.
117. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е.Вильсон. – Москва: Стройиздат, 1982. – 447 с.
118. Угримов С.В. Односторонний контакт многослойной полосы и упругого основания при импульсном нагружении / С.В. Угримов, А.Н. Шупиков, Я.П. Бузько // Науковий вісник будівництва – Харків: ХТУБА, 2005. – Вип. 34. – С. 285 – 291.
119. Угримов С.В. Динамічна контактна задача для двох смуг / С.В. Угримов, О.М. Шупіков // Машинознавство. – Харків, 2003. - №4 (70). – С. 13 – 17.



120. Розрахунок на міцність багат шарового дорожнього покриття нежорсткого типу на основі уточненої теорії [ Довгополова Н.В., Сметанкіна Н.В., Угримов С.В., Шупіков О.М., Долгополов С.В., Голендер В.А.]. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип. 39. – С. 177 – 183.
121. Дорошко Є.В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі: автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» / Є.В. Дорошко. – Харків: ХНАДУ, 2016. – 20 с.
122. Дубик О.М. Фізичне моделювання реологічних процесів в конструкціях нежорстких дорожніх одягів / О.М. Дубик, С.М. Талах // Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій: Всеукраїнська Інтернет-конференція молодих учених і студентів, 18.03.2015 р.: тези доповіді. – Полтава, 2015. – С. 160 – 163.
123. Смирнов А.В. Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций [Текст] / А.В. Смирнов. – Омск: изд-во ОмГТУ, 1993. – 128 с.
124. Иосилевич Г.Б. Прикладная механика [Текст] / Г.Б. Иосилевич, Г.Б. Строганов, Г.С. Маслов. – М.: Высшая школа, 1989. – 351 с.
125. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / В.Г. Зубчанинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.
126. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого тела [Текст] / Ю.М. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 650 с.
127. Ряпухін В.М. Розрахунки асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів з урахуванням термопластичних властивостей асфальтобетонів [Текст] / В.М. Ряпухін, А.Г. Батракова, Н.О. Нечитайло. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 132 с.
128. Вялов В.В. Реологические основы механики грунтов [Текст] / В.В. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
129. Ржаницын А.Р. Теория ползучести [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
130. Горячев М.Г. Обоснование суммарного размера движения для расчёта нежестких дорожных одежд с учетом процесса накопления остаточных

деформаций [Текст]: дис....канд. техн. наук / Михаил Геннадьевич Горячев – Москва, 1999. – 250 с.

131. Елгонов А.Н. Обоснование мероприятий по ремонту нежестких дорожных одежд на основе оценки её прочности и ровности: автореф. дис.. канд. техн. наук [Текст]: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1992. – 17 с.

132. Костира Н.О. Нелінійне деформування гнучких оболонкових конструкцій складної форми: дис.. канд.. техн. наук [Текст]: автореф. дис...канд.. техн. наук. – К., 2009. – 20 с.

133. Шимановский А.В. Теория и расчёт сильнонелинейных конструкций [Текст] / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский. – Киев: Сталь, 2005. – 432 с.

134. Шимановский А.В. Оптимизация комбинированных пространственных систем [Текст] / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский, С.М. Талах. – Киев: Сталь, 2012. – 462 с.

135. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности [Текст] / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

136. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости [Текст] / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

137. Дубик О.М. Дослідження напружено-деформованого стану ізотропного ґрунтового півпростору під конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу / О.М. Дубик // Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців: Міжнародна науково-практична конференція, 6 листопада, 2014 р.: тези доповіді. – Харків, 2014. – С. 16 – 21.

138. Баженов В.А. Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды [Текст] / В.А. Баженов, А.С. Сахаров, В.К. Цыхановский // Прикладная механика. – К.: Институт механики НАН Украины, 2002. – Т. 38 (48), №6, июль. – С. 24 – 63.

139. Баженов В.А. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел [Текст] / В.А. Баженов, А.И. Гуляр, А.С. Сахаров. – К.: Изд-во НИИ Строймеханики, 1993. – 376 с.
140. Дубик О.М. Модель загального процесу нелінійного деформування нежорстких дорожніх одягів / О.М. Дубик, С.М. Талах // Міське середовище XXI ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн: Міжнародний науково-практичний конгрес, 15 – 18 березня 2016 р.: тези доповіді. – Київ, 2016. – С. 29 – 30.
141. Вайнберг Д.В. Система математического обеспечения расчета пространственных конструкций «Прочность-1» [Текст] / Д.В. Вайнберг, В.Н. Кислокий, А.С. Сахаров, А.Л. Синявский // Организация и методика строит. проектирования. – М.:ЦНИИПАС, 1974. – Сер. X, вып.2. – С.23 - 38.
142. Кислокий В.Н. Принципы построения ППП ПАРУС для решения задач статики и динамики сильнонелинейных комбинированных пространственных конструкций / В.Н. Кислокий, В.К. Цыхановский, Т.А. Касилова, А.В. Мацвейко, В.Е. Боговис, М.С. Барабаш // Тезисы докл. V Междунар. конф. «Мягкие и гибкие оболочки в народном хозяйстве». – Краснодар, 1990. – С. 142 – 143.
143. Коренев Б.Г. Расчёт плит на упругом основании [Текст] / Б.Г. Коренев, Е.И. Черниговская. – М.: ГИЛСА и СМ, 1962. – 355 с.
144. Цытович Н.А. Механика грунтов / Николай Александрович Цытович. – М.: гос. изд-во лит. по стр., архит. стр. мат., 1963. – 636 с.
145. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов [Текст] / М.Е. Харр. – М.: Мир, 1971. – 320 с.
146. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С.Войновский-Крюгер. – М.: Гос. Изд-во ФМЛ, 1963. – 635 с.
147. Угодчиков А.Г. Некоторые методы решения на ЭЦВМ физически нелинейных задач теории пластин и оболочек [Текст] / А.Г. Угодчиков, Ю.Г. Коротких. – Киев: Наукова думка, 1971. – 217 с.
148. Технологічний регламент проведення ремонту дорожніх конструкцій з використанням методу холодного ресайклінгу на дорозі Київ-Ковель км

297+600 – 302+600 та км 337+400 – 343+400 [Текст] / Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна. – К., 2005. – 32 с.

149. Дубик О.М. Розрахунки на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу / Дубик О.М., Талах С.М. // Вісник інженерної академії України. – Київ: НАУ, 2014. – Вип. 2. – С 176-181.

150. Дубик О.М. Розрахунки на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу (з використанням ПК CREDO РАДОН) / О.М. Дубик // Аеропорти – вікно в майбутнє: Міжнародна науково-практична конференція, 16-17 червня 2014 р.: тези доповіді. – Київ, 2014. – С. 16–18.

151. Дубик О.М. Математична модель розрахунку відновленого за технологією холодного ресайклінгу нежорсткого дорожнього одягу, армованого геосинтетичним матеріалом / О.М. Дубик, С.М. Талах // Архітектура та екологія: Міжнародна науково-практична конференція, 17–19 листопада 2014 р.: тези доповіді. – Київ, 2014. – С. 145 – 148.

152. Пойченко В.В. Современные грузовые автотранспортные средства. Справочник / В.В. Пойченко, П.В. Кондрашов, С.В. Потемкин, О.В. Пойченко, Т.С. Хабарова. – М.: агенство «Доринформсервис», 2004 р. – 592 с.

153. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування: ВБН Г.1 – 218 – 050 – 2001. – К.: Українська державна корпорація по ремонту та утриманню автомобільних доріг. – 12 с.

154. Ільченко В.В. Відновлення дорожніх одягів із застосуванням технології холодного ресайклінгу / В.В. Ільченко // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка ]. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – 2010. – Вип. 2. – С. 161 – 165.

## ДОДАТОК А

## АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ARDO

```

subroutine danosu(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
1,xe,ue,u1e,neqd)
c
c   Раздел dat_Dubik.f
c   =====
c   11.05.2014-----Дубик О.М.
c
c   Задача розрахунку згинання прямокут.тонких пластин на пружній основі
c   *----- -розрахункова схема включає плиту на яку діє вертикальна
c   *----- сила від автотранспорту Q=100 кН, P=0,6 МПа
c   *-----визначення НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу
c   *-----при зміні модуля пружності в шарах з регеноерованої
c           асфальтобетонної суміші за схемою СО-5 на пр.основі
c   Задання вхідних даних варіант
c   а)розміри плити в плані 5 x 15м,толщ. экв.-НО=37см.,НС=7см,
c       НS=41см
c       m2:  m3:
c   *****19   42
c*****
c
c
c   implicit real*8(a-h,o-z)
c   character*8 dpf(13)
c   character*8 dz(20)
c   character*8 fdz(20)
c   character*4 nop(2)
c   logical*4  onlydn,id,ctor,geolin,obxsg,fors,memor
c   1,ltem,chigr
c   2,norebr,cmetr
c   3,otlpri,prnf,prx3,prqr,prtm,prwm,prun,prfl,prvu,prus
c   4,cload
c   5,seq,open,back,clos,cont
c   7,cikl,prgs,pavari
c
c   EXTERNAL CORVS3
c   dimension p(m),nf(nux),x(3,nux),u(3,nux)
c   1,ul(3,nux),wm(1),filg(18,nux2)
c   dimension xe(neqd),ue(neqd),ule(neqd)
c   dimension cvo(3),cyo(3),CDO(3),PKE(30),RMP2(60),RMP3(60)
c*
c
c   common/panu0/nu0nc
c
c   common/PARWIN/eos,vos,fnds,dink,gpss,dnkl,pnevp,reo
c*
c   common/sosul/isk31,isk32,isk33,isk34,qus1,qus2,qus3,qus4
c*
c   COMMON/CUVREG/DKV
c   common/nksetk/NK12(4),NK3(3),NK4(3),NKOT(4),NK5(3),NK6(3)
c   common/nksetu/NK1(3),NK2(2)
c   common/dims/m1,m2,m3
c   common/one/nms,nst,nsl,irab
c   1,jn14,jn15,jn17,jn18,jn23,jn24,jn26,jn27
c   2,afin,det,get,e,v,a(3,2),cof(3,3,27)
c   3,ck(3,3),cn(3,3),gn(3,3),els(9,3,3),fn(3,3,3)
c   common/pi/pi
c   common/onlydn/onlydn /ind/id(30) /ctor/ctor
c   common/geolin/geolin,obxsg /rfors/fors /memor/memor
c   common/temper/ltem /chigr/chigr
c   common/rav/qra,qbez,norebr,cmetr /qpro/q1,q2,q3,ny /cho/cho,nnp

```

```

common/plt/rom /pareb/hrho(99),exho(99)
common/pavkl/ev(99),vv(99) /parom/romm(99)
common/orteln/e1,e2,e3,v21,v31,v32,g12,g13,g23,vklo(9,1)
common/prin/prnf,prx3,prqr,prtm,prwm,prun,prfl,prvu,prus
common/otlpri/otlpri,nlista,nop,nlin(2),nkp111
common/dpf/ip,kp,im,km,dpf
common/inzero/imax,in(1080) /driver/jdr,ne4,ne7,cload,epsg,npp
common/prgals/nrl,nrp,nrpc,nrpl,nrpp,ns,ns1,nl,nl1,np,np1
common/files/nfl(10),izp(10),nzp(10),ifl(10),nm(10)
1,seq(10),open(10),back(10),clos(10),cont(10)
common/ene/eniz,enmem,enp,enpl,endis,envs,enpot,enkin,env1,env2
common/nelinf/itr,itv,itc,itf,dqr,qrf,qrk,sdinp,eps,rj,cikl,prgs
common/avtoch/epmax,cymen,cymens,cyvel,ogrv,itmin,itsr,itmax
common/prpac/pr(10),pac(30),kpc(10),npr,npac,nkpc
common/det1/demin,isign,jstep,cmax,cmin
common/spusk/rus,rqs,dspus,nspus,is,js
common/rona/rona,amash,qsp,dsp
common/bazus/mbaz,kbaz(50,2)
common/pavari/covar,pavari
common/kvnev/ri,r0,epn,r
common/dim/dim1,dim2,dim3 /nach/x1(3) /rs/rs
common/silotp/qro,dqro,qd0,qdp,itopl
logical itopl

C
C   вставка з "вхідного рядка"
C   -----
C   DIMENSION ROK(10),DA(10),DB(10),HO(10),IPP(10)
C   dimension dz(20)

C
C
C   logical telo
C   common/ansvi/ans
C   logical ans
C   COMMON/ANSVIK/INSV
C   COMMON/REAKAN/RAN(3,100)
C   COMMON/OGITR/ITRKS
C   common/urek/u2(3,2856)
C   common/uskor/u3(3,2856)
C *****корекція          =====      2 x 28 x 51 x 3 = 8568
C *****                  =====      2 x 28 x 51 = 2856

common/cor/al0,alp,ugn
common/parsr/prr,dpr,prrk,napn
common/dinpar/dt,plot,engkl,engk2
common/relpar/rlp,rlp0
common/iucor/iuc
logical iuc
common/paros/ei,vi,eic,gmu,skm,epnl,prio,ios,indo,itros,izr(2,2)
common/memis/imo,iske
logical prio,ios,indo,imo
common/karans/kps(50,2),kas(50,2),muzp,muza
common/dparo/dgm,cgm,itr,itrps,cuvqrs,dqr2e,ad0,adp,
* itru2,itru3,rezp0,rezp1,izsh,itrpr,itrpk
logical rezp0,rezp1
common/nload/nload,iload
common/iuvup/dsp2,itvkn,irelx,iank
logical irelx,iank
common/itvbeg/itvdat
common/regcof/rcf

C
C   common/parnas/qsn,qsv,qsk1,qsk2,qvd,qal,qsal,qsas,qsas3,
C   * sq1,sq2,sq3,qrl,qdn,
C   * dqsv,dqsk1,dqsk2,dqvd,dqdn,dsq1,dsq2,dsq3,dqrl,
C   * cpl(20),atf(20)

C

```

```

common/nksot/nks(9,20),nqf
common/nfans/nfas(8,4),iamn,iamx
C
common/ipovn/ipovs
logical ipovs
common/almark/itvk0,itvk1,fc(10),repl,itvm
common/iparn/itpv(3,20),itp(20),nqh(2,9)
common/inprif/ifpri
logical ifpri
common/nkpri/nkp(12,20),fss(200),fsm(200),fu(6,200),npf
common/fname/fdz(20)
common/dinfpr/dnpf(6,20)
common/nost/inost(4)
COMMON/DX/DX(3)
COMMON/DOP/GS(3,3),FS(3,3,3),GK(3,3),PO,GSK(3,3),DETS
C
common/ishaps/ihps
common/ITKRIV/itdkv
C
common/iregks/irks
logical irks
common/conreg/iconr
logical iconr
C
COMMON/URKRAR/PARABL
LOGICAL PARABL
C
equivalence (dz(1), fdz(1))
C
C=====
C *****вихідні дані *****
C
C**      data NK12/8,20,8,21/,NK3/9,19,20/,NK4/9,19,21/,
C**      *NKOT/9,2,19,19/,NK5/9,14,1/,NK6/15,19,1/
C
data NK1/7,17,22/,NK2/8,11/
C
data nsh,ksh2,izh /0, 10, 10/
C
інформація про параметри поверхневих сил
C -тип 2 по сіт.коорд.S2,S3, інтенсивн. QDN по спеціальній
C функції CINVN
C
C      N1  N2  N3  K2  K3  LS2  LS3  NNS  IT
data nks /  1,  1,  1, 28, 51, 1,  1,  1,  5,
*          1,  7, 25,  9, 27, 1,  1,  1,  7,
*          1,  7, 19,  9, 21, 1,  1,  1,  7,
*          1,  7, 13,  9, 15, 1,  1,  1,  7,
*          1, 11, 13, 13, 15, 1,  1,  1,  7,
*          1, 11, 19, 13, 21, 1,  1,  1,  7,
*          1, 11, 25, 13, 27, 1,  1,  1,  7,
*          1, 11, 31, 13, 33, 1,  1,  1,  7,
*          1, 11, 37, 13, 39, 1,  1,  1,  7,
*          1,  7, 37,  9, 39, 1,  1,  1,  7,
*          1,  7, 31,  9, 33, 1,  1,  1,  7,
*          81*0/
data nqf / 11/
C
C      NN2 NN3  K2  K3  LS2  LS3  ITP  ITFV  NBF  IBF  ISD  ITPF
c      data nkp /  5, 11, 15, 21,  1,  1,  3,  1,  3,  1,  1,  1,
c      *          1, 11,  5, 13,  1,  1,  3,  1,  3,  2,  0,  4,
c      *          5,  1,  7, 10,  1,  1,  3,  1,  2,  2,  0,  5,
c      *          204*0 /
data npf / 2/

```

```

c
c   Інформація про анкерні зв'язки по фрагментам
C       N1A N2A N3A K2A K3A NSA ITAN ITAK
c   data nfas /   1, 17, 1, 17, 33, 3, 1, 4,
*           0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
*           0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
*           0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 /

c
c   data dnpf / 0.0248d0, 0.0565d0, 0.08098d0, 6.6d0, 5.6d0, 1.0d0,
c   *3*0.00484d0,0.d0,0.6d0, 1.0d0, 3*0.03505d0, 0.d0, 1.2d0, 1.0d0,
c   *2*0.02448d0,0.04896d0,2.8d0,5.6d0, 1.0d0, 0.04896d0, 0.03575d0,
c   * 0.08471d0, 2.993d0, 4.0d0, 1.0d0, 90*0.d0 /

c
c   data dz/' P1LONF ',' R1GP1L ',' V1SFER ',' FNIT01 ',' FNIT02 ','
c   *       ' FNIT03 ',' FNIT11 ',' FNIT12 ','           ','           ','
c   *       ' P1LONF ',' R1GP1L ',' V1SFER ',' FNIT01 ',' FNIT02 ','
c   *       ' FNIT03 ',' FNIT11 ',' FNIT12 ','           ','           ' /

c
c   DATA RMP2/4*62.50d0,2*33.750d0,2*22.0d0,2*28.50d0,2*22.0d0,
*41.30d0,4*47.50d0,48.20d0,8.0d0,42.0d0,2*75.0d0,5*110.0d0,
*33*0.0d0/
c   DATA RMP3/106.0d0,4*108.0d0,47.6,46.60d0,2*42.40d0,27.0d0,
*6.0d0,8.0d0,2*22.0d0,4*31.750d0,2*22.0d0,4*31.750d0,
*2*22.0d0,4*31.750d0,2*22.0d0,4*31.750d0,2*22.0d0,8.0d0,
*6.0d0,27.0d0,2*42.40d0,46.60d0,47.60d0,4*108.0d0,106.0d0,
*10*0.d0/
c *****
c
c   call obnul(u2,8568,0,0)
c   call obnul(u3,8568,0,0)

c
c   PARABL=.FALSE. --- КРУГОВА          КРИВА
c   PARABL=.TRUE.  --- ПАРАБОЛІЧНА КРИВА
c
c   PARABL=.FALSE.

c
c   pi=4.d0*datan(1.d0)

c
c***   Задання початкового вузла для друку поля зусиль і моментів
c**     nu0nc=1
c**     nu0nc=2477
c**     nu0nc=2597
c**     nu0nc=1249
c**     nu0nc=1
c***

c
c   Геометрія оболонки (формується зверненням до підпрограми COARPL)
c
c*     RN=35.0d0
c*     HP=0.050d0
c*
c     AL=1492.0D0
c     BL=2244.0D0
c     ATK=101.0D0
c     BTK=171.0D0
c     ATF0=153.0D0
c     BTF0=BTK
c     RE=44.0D0
c     HO=100.0D0
c**     HS=100.0d0
c**     hs=85.0d0
c     hs=44.0d0

c
c     hs=64.0d0

```



```

C
  IS2P=7
  IS3P=25
C*   IRM=30
     irm2=60
     irm3=60
C
C*   WRITE (*,*) ' BEFOR CALL CORDIS: END 0'
C**   WRITE (*,*) ' HOV=12,HKV=16,HON=20,HKN=25,AVE=185,BVE=909 0'
C**   WRITE (*,*) ' ANE=1636,BNE=1255,RKF=160,REBRO.NA NIG.KRM. 0'
C     write(*,783) PKE
C 783 FORMAT ( /5x,5D13.6)
C
      call corpos(rmp2,rmp3,irm2,irm3,al,bl,hs,x,nux)
C
C*   call coarpl(al,bl,at,bt,re,ho,is2p,is3p,x,nux)
C*
C*   CALL COORDB(X,NUX,AL,ABB,HK)
C
C*   WRITE(*,*) ' after call coarpl: end 1'
C     write(*,783) PKE
C
C**   WRITE(*,*) ' POLE COORDINATES CORPOS - nachalo '
C**   WRITE(*,*) ' HOV=12,HKV=16,HON=20,HKN=25,AVE=185,BVE=909 0'
C**   WRITE(*,*) ' ANE=1636,BNE=1255,RKF=160,REBRO.NA NIG.KRM. 0'
C
C**   DO I=1,NUX
C**     WRITE(*,781) I, X(1,I), X(2,I), X(3,I)
C**   ENDDO
C** 781 FORMAT( 1x,i10,3d13.6)
C
302 CONTINUE
C
с     ФЭМК ребер і вставок
C
C     HR1=PKE(20)
C     HR2=PKE(21)
C
C     HR3=PKE(22)
C     HR4=PKE(23)
C
с     1-Й ТИП РЕБРА І ВСТАВКИ
с     нижня частина (опорна) кранової форми
C
EV(1)=2.60d3
VV(1)=.30D0
HRHO(1)=0.460d0
EXHO(1)=-0.227D0
ROMM(1)=.560D0
C
C*   EV(1)=1.09d5
C*   VV(1)=.22D0
C*   HRHO(1)=231.4D0
C*   EXHO(1)=112.43D0
C*   ROMM(1)=.039D0
C
с     2-Й ТИП РЕБРА І ВСТАВКИ
C
с     средняя частина кранової форми
C
C*   EV(2)=1.05D5
C*   VV(2)=.22D0
C*   HRHO(2)=245.7D0
C*   EXHO(2)=119.57D0

```

```

C*      ROMM(2)=.038D0
C
C      3-ий ТИП РЕБРА І ВСТАВКИ
C
C*      EV(3)=1.2D5
C*      VV(3)=.22D0
C*      HRHO(3)=91.4D0
C*      EXHO(3)=45.20D0
C*      ROMM(3)=0.04D0
C
C      4-ий ТИП РЕБРА І ВСТАВКИ
C
C*      EV(4)=2.1D6
C*      VV(4)=.3D0
C*      HRHO(4)=3.285D0
C*      EXHO(4)=1.3333D0
C*      ROMM(4)=1.0D0
C
C      фізико-механічні константи для оболонки(пластинки)
C*      e=2.690D5
C
C*      E=2.80d5
C*      e=3.240d5
C
C*      E=1.9530D5
e=3.610d5
C
C      e=3.50d5
C
C*      v=0.220D0
C*      v=0.244d0
v=0.2390d0
C
C*      v=0.231d0
C
C*      V=0.240D0
C
C      Рівномірно розподілене навантаження - приведена власна вага
C
C*      rom=0.002296d0
rom=0.0027860d0

C**      ROM=0.0011D0
C*      Фізико-механічний характер.основи
C*
C*      eos=327.00d0
C*      vos=.33d0
C*
C      Параметри верт.колісної дії
C*      fnds=176424.0d0
C*      dink=1.15d0
C*      gpss=1.00d0
C*      dnkl=4.0d0
C*      pnevp=13.90d0
C*
C*      Еквівалентний радіус відбитка
C*      REO=dsqrt(fnds*dink*gpss/(dnkl*pi*pnevp))
C*      Еквівалентний коефіцієнт постелі ґрунт.основи
C*      QSN=PI*eos/((2.0d0+PI)*(1.0d0-vos**2)*reo)
C*      QSN=12.0d0
C*      QSN=10.80d0
C*      QSN=4.230d0
C
C      *Тиск.пневмат.приведенної квадратної форми коліс.відбитку-РА кг/см2

```

```

C*
PA=11.0D0
C*
*Амплітудне значення зосереджених сил QUS1,QUS2,QUS3
QUS1=-5324.0D0
QUS2=-2662.0D0
QUS3=-1331.0D0
C*****
C   друк тільки вихідних даних - onlydn=.true.
C**   onlydn=.true.
      onlydn=.false.
C
nrpc=10010110
C
C   Друк ПОЛЯ ПРИЗНАКІВ-prnf=.true.
C***   prnf=.true.
      prnf=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ КООРДИНАТ-prx3=.true.
C**   prx3=.true.
      prx3=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ НАВАНТАЖЕНЬ-ВЛАСНА ВАГА-prqr=.true.
C**   prqr=.true.
      prqr=.false.
C   prun=.true.
C   prfl=.true.
C   ДРУК ПОЛЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ
C**   id(3)=.true.
      id(3)=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ КОРД.НАПРУЖЕНЬ
C**   id(4)=.true.
      id(4)=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ ГОЛОВНИХ НАПРУЖЕНЬ
      id(5)=.true.
C**   id(5)=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ ЗУСИЛЬ І МОМЕНТІВ
C**   id(6)=.true.
      id(6)=.false.
C   ДРУК ПОЛЯ РЕАКЦІЙ
      id(7)=.true.
C*   id(7)=.false.
C**   id(14)=.true.
      id(14)=.false.
      id(16)=.false.
C**   id(16)=.true.
C*
fors=.false.
C   FORS=.TRUE.
KS21=NK12(2)+1
call telos(nf,nux,1,1,m2,m3,0)
C   call telos(nf,nux,11,5,16,16,1)
C
C
C   *** Опис ребер и вставок ***
C
C   Ребро на нижній кромці оболонки тип-1 тип вставки -1
C
C   NR21=NKOT(1)
C   NR31=NKOT(2)
C   KR21=NKOT(3)
C   KR31=NKOT(4)
C   KR32=NKOT(5)
C
C   KR33=NKOT(6)
C   KR34=NKOT(7)
C

```

CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 11, 28, 12, 1)  
 CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 11, 28, 12, 1)  
 CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 40, 28, 41, 1)  
 CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 40, 28, 41, 1)  
 CALL ZATRE (NF, NUX, 19, 1, 20, 11, 1)  
 CALL ZATVK (NF, NUX, 19, 1, 20, 11, 1)

C

CALL ZATRE (NF, NUX, 19, 12, 20, 40, 1)  
 CALL ZATVK (NF, NUX, 19, 12, 20, 40, 1)  
 CALL ZATRE (NF, NUX, 19, 41, 20, 51, 1)  
 CALL ZATVK (NF, NUX, 19, 41, 20, 51, 1)

C

C\*\* CALL ZATRE (NF, NUX, 26, 1, 27, 8, 1)  
 C\*\* CALL ZATVK (NF, NUX, 26, 1, 27, 8, 1)  
 C\*\* CALL ZATRE (NF, NUX, 26, 9, 27, 32, 1)  
 C\*\* CALL ZATVK (NF, NUX, 26, 9, 27, 32, 1)  
 C\*\* CALL ZATRE (NF, NUX, 26, 33, 27, 41, 1)  
 C\*\* CALL ZATVK (NF, NUX, 26, 33, 27, 41, 1)

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 1, 14, 3, 1)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 1, 14, 3, 1)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 12, 3, 14, 43, 1)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 12, 3, 14, 43, 1)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 41, 12, 43, 1)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 41, 12, 43, 1)

C

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 9, 23, 12, 26, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 9, 23, 12, 26, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 9, 38, 12, 41, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 9, 38, 12, 41, 3)

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 8, 23, 9, 25, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 8, 23, 9, 25, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 10, 26, 12, 27, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 10, 26, 12, 27, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 8, 39, 9, 41, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 8, 39, 9, 41, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 10, 37, 12, 38, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 10, 37, 12, 38, 3)

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 21, 12, 23, 2)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 21, 12, 23, 2)

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 9, 3, 12, 6, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 9, 3, 12, 6, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 9, 18, 12, 21, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 9, 18, 12, 21, 3)

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 8, 3, 9, 5, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 8, 3, 9, 5, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 10, 6, 12, 7, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 10, 6, 12, 7, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 8, 19, 9, 21, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 8, 19, 9, 21, 3)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 10, 17, 12, 18, 3)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 10, 17, 12, 18, 3)

C

C РЕБРО-ВСТАВКА, ТИП 4-ЗОНИ ПРИМИКАННЯ ДО КОНТУРУ

C

C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 1, 3, 8, 4, 4)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 1, 3, 8, 4, 4)  
 C\* CALL ZATRE (NF, NUX, 11, 7, 12, 17, 4)  
 C\* CALL ZATVK (NF, NUX, 11, 7, 12, 17, 4)

```

C*      CALL ZATRE (NF,NUX,1,20,8,21,4)
C*      CALL ZATVK (NF,NUX,1,20,8,21,4)
C*      CALL ZATRE (NF,NUX,1,23,8,24,4)
C*      CALL ZATVK (NF,NUX,1,23,8,24,4)
C*      CALL ZATRE (NF,NUX,11,27,12,37,4)
C*      CALL ZATVK (NF,NUX,11,27,12,37,4)
C*      CALL ZATRE (NF,NUX,1,40,8,41,4)
C*      CALL ZATVK (NF,NUX,1,40,8,41,4)

с      Накладання зв'язків на задані вузли моделі
с      *****
с      ЗВ'ЯЗКИ ЗА ПЛОЩИНАМИ СИМЕТРІЇ
с      ПЛОЩИНИ СИМЕТРІЇ РОЗРАХУНКОВОГО ФРАГМЕНТУ
с      НА ПЕРЕМІЩЕННЯ І КУТИ ПОВОРОТУ ПО 2-ому и 3-му НАПРЯМУ
с
с      ШАРНІРИ
с
с      *-----Площина симетрії і нижній край
C**      call zakrob(nf, nux, 3, 1, 1, 1,m3, 0, 1, 0)
call zakrob(nf, nux, 3, 1, 1, 1,m3, 0, 1, 0)
call zakrob(nf, nux, 3, 1, 1, m2,1, 0, 0, 1)

с
C*      call zakrob(nf, nux, 1, 1, 1, 1,m3, 1, 1, 0)
C*      call zakrob(nf, nux, 1, 1, 1, m2,1, 1, 0, 1)
с
с      ЗАКРІПЛЕННЯ ОПОР - НА ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗА 2-м і 3-м НАПРЯМОМ,
с      -Верхній і правий край плити - Шарнірне защемлення
с
call zakrob(nf, nux,3,1,m3,m2,m3,0,0,1)

с
call zakrob(nf, nux,3,m2,1,m2,m3,0,1,0)

с
C*      call zakrob(nf, nux,1,1,m3,m2,m3,1,0,1)
с
C*      call zakrob(nf, nux,1,m2,1,m2,m3,1,1,0)
с
C*      call zakrob(nf, nux,1,1,m3,m2-1,m3,0,1,0)
C*      call zakrob(nf, nux,1,1,1,1,m3,1,1,0)
C*      call zakrob(nf, nux,1,m2,1,m2,m3,0,0,1)
C*      call zakrob(nf,nux,3,2,2,2,m3-1,1,0,0)
C*      call zakrob(nf,nux,3,14,37,14,37,0,1,0)
с
с      ЗАКРІПЛЕННЯ ОПОР --- ШАРНІРИ - ПО КОНТУРУ
с
C**      call zakrob(nf,nux,1,m2, 2, m2, m3-1, 1,0,0)
C**      call zakrob(nf,nux,2, 1, 1, 2, 1, 1,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,42,13,42,0,0,1)
с      call zakrob(nf,nux,2,13,42,13,42,1,1,0)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,4,42,4,42,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,4,22,4,22,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,4,2,4,2,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,2,13,2,0,0,1)
с      call zakrob(nf,nux,2,13,2,13,2,1,1,0)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,10,13,10,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,14,13,14,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,30,13,30,0,0,1)
с      CALL ZAKROB (nf,nux,1,13,34,13,34,0,0,1)
C**      call zakrob(nf,nux,2,1,m3,m2,m3,1,0,1)
с      ЗВ'ЯЗКИ ПО НИЖНІЙ КРОМЦІ ФРАГМЕНТА
с      ОБОЛОНКИ
с      call zakrob(nf,nux,1, 1,1,7,1,1,0,1)
с      КОНТРФОРСА
C**      call zakrob(nf,nux,1,8,1,M2,1,1,0,1)
с      ЗАКРІПЛЕННЯ НИЖНЬОЇ КРОМКИ ОБОЛОНКИ

```

```

C      call zakrob(nf,nux,1,1,1,7,1,1,0,0)
C
C
C      зв'язки по 1-ому напрямку., виключаючи рух
C      всієї розрахункової моделі як жорсткого цілого
C      CALL ZAKROB(NF,NUX,3,4,1,4,1,1,0,0)
C      ЗВ'ЯЗКИ НА ОПОРАХ ПО ЗОВНІШН.КОНТУРУ ПО 3-МУ НАПРЯМУ
C      call zakrob(nf,nux,3,M2-1,1,M2,12,0,0,1)
C
C      DO J=13,25,2
C      call zakrob(nf,nux,3,M2-1,J,M2,J,0,0,1)
C
C      enddo
C
C      call zakrob(nf,nux,3,m2-2,12,m2-2,14,0,0,1)
C      call zakrob(nf,nux,2,m2-1,11,m2,15,1,1,0)
C      call zakrob(nf,nux,2,m2-2,12,m2-2,14,1,1,0)
C
C      Анкерні зв'язки в наявності (відсутні)
C*      ans=.true.
C
C      ans=.false.
C      =====
C      iamn=1
C      iamx=2
C
C      інформація про навантаження qra - інтенсивність навантаження
C      qbez - безрозмірний коефіцієнт навантаження
C      dspus - приріст навантаження на першому кроці
C
C      cuvqrs=1.d0
C
C      задання рівномірно розподіленого навантаження (власна вага)
C
C*      задання параметрів зосередженого навантаження
C*
C**      isk31=10
C**      isk32=11
C**      isk33=10
C**      isk34=11
C*
C*      qus1=0.12260d0/4.0d0/(m3-1)
C*      qus2=qus1/2.0d0
C*      qus3=0.d0
C*      qus4=0.d0
C*
C      qra = 0.0d0
C      dqr2e=-1.0d0
C      jsh=10
C
C      qbez =1.d0
C
C      nload=1
C      iload=1
C
C      задання поля характерних і контрольних вузлів
C
C      mbaz=5
C      kbaz(1,1)=nuzl(1,7,13)
C      kbaz(1,2)=1
C      kbaz(2,1)=nuzl(1,is2p,is3p)
C      kbaz(2,2)=1
C      kbaz(3,1)=nuzl(1,7,37)
C      kbaz(3,2)=1

```

```

kbaz(4,1)=nuzl(1,7,45)
kbaz(4,2)=1
kbaz(5,1)=nuzl(1,is2p,is3p)
kbaz(5,2)=3
C*   kbaz(6,1)=nuzl(1,m2,1)
C*   kbaz(6,2)=3
c
muza=0
muzp=0
c
c   задання керуючих параметрів і коефіцієнтів
c
cyvel=1.d0
cymens=1.d0
c
nnp=1
c
itopl=.false.
C
ipovs=.true.
C*   ipovs=.false.
c
DKV=45.0D0
C
rlp =1.0d0
rlp0=1.0d0
dsp2=0.d0
itvkn=80
itvdat=itvkn
irelx=.false.
itvk1=izh
ihps=10
prrr=0.d0
dprrr=1.011d0
prrk=1.000d0
dt=.1d0
plot=.1d0
itmax=100
c
c   корекція напруженого стану з урахуванням одновісних зон :
c   ios=.true.
c   відключення корекції
c   ios=.false.
c
c   параметри для реалізації одновісного стану
c   мембранних напружень
prio=.false.
ei=e
vi=v
gmu=300.d0
gm2=gmu**2
dgm=50.d0
cgm=300.d0
itrgk=1
itps=5
C*   ios=.true.
iske=0
indo=.false.
imo=.false.
epn1=1.d-3
skm=-pi**2*ei/3.d0/gm2
c
epn=1.d-12
c

```

```

      ogrv=2.d0
с
с      параметри для продовження задачі з контрольної точки
с*****
с      на першому кроці ці оператори коментуються
с      stor=.true.
с      stor=.false.
с
с
с      ifl(4)=ifl(5)
с      nzp(4)=1
с      nzp(5)=nzp(4)+1
с      open(5)=.true.
с*****
с      cont(5)=.false.
с
с      режим зчитування результатів
с      для продовження з контрольної точки
с
с      rezp0=.false.
с      rezp0=.true. - для обробки і видачі кінечних результатів
с
с      rezp1=.false.
с      itru2=0
с      itru3=0
с      itrgr=0
с
с      itc=izh
с
с      ITVM=12 - виведення робочої інформації через ITVM кроків
с
с      ifpri=.true.
с
с      itvm=10
с
с      керування комбінованим алгоритмом через параметр
с      числа кроків на окремих етапах алгоритма і скінченного
с      числа кроків
с
с      napn - число кроків 1-го етапу - метод послідовних
с      навантажень
с      ksh2 - кількість кроків 2-го етапу - метод Ньютона-Канторовича
с      itru2+1 - кількість кроків 3-го етапу - метод дискретних
с      торможений, ksh2-приймається тільки парні знач., ksh2=0->itru2=0
с      itps - кількість кроків 4-го етапу - врахування зон одновісного
с      напруженого стану
с      izh - плануєма кінцева кількість кроків продовження
с      по параметру збурення
с
с      napn=nsh
с      if(ksh2.ne.0) itru2=ksh2-1
с      izsh=izh
с
с      парам. навантаж 1-го етапу алгоритму
с      при napn=0 - 1-ий етап алгоритму відсутній!
с
с      if(nsh.eq.0) go to 150
с
с      a10=qra/1000.d0
с      dspus=a10
с      nsh2=nsh/2
с      alp=(qra/nsh2-2*a10)/(nsh-1)
с
с      if(ksh2.eq.0) go to 151

```



```

c
150 continue
c
c   парам. Навантаж. 2-го етапу алгоритму
c
      ad0=dqr2e/jsh
      if(nsh.eq.0) dspus=ad0
      dsh2=ksh2/2
      adp=(dqr2e/dsh2-2*ad0)/(ksh2-1)
c
c***      adp=0.d0
151 continue
c
      epmax=1.d14
      cnm=2000.d0
      cnr=cnm*6.d0
c
c   Задання параметрів інтенсивності поверхневих
c   навантажень и впливів
c   IRKS=.TRUE. - зменшення коефіцієнта регуляризації за
c               тригонометричною функцією
c   IRKS=.FALSE. - зменшення коефіцієнта регуляризації за
c               лінійною функцією
c
      irks=.false.
c
c   ICONR=.TRUE. , IRKS=.FALSE. - коефіцієнт регуляризації
c   (фіктивної вязкості) постійний
c   ICONR=.FALSE. - коефіцієнт регуляризації змінної
c
      iconr=.false.
c
      if(.not.ipovs) go to 519
      call papovn
519 continue
c
c*      WRITE(*,*) ' POLE PRIZNAKOV '
c*      DO i=1,nux,2
c*      WRITE(*,901) i, nf(i)
c*      ENDDO
c* 901 FORMAT( /5x,2i10)
c*      STOP
c
c*****
c
c   читання вихідних даних з ВЗУ
c
CC*   if (id(1)) call vixzap(x,neqd,f,1,f,1,f,1,f,1,f,1,nfl(1))
c
c   Друк титульної сторінки лістинга, вихідних констант, інформації
c   про ребра і включення, каталога файла запису, параметрів системи
c   рівнянь, режимів роботи обчислювального комплексу, перетворення
c   координат і фізико-механичних констант
      WRITE(*,*) ' befor call prdanu: end 2'
c   do i=1,nux
c   WRITE(*,781) I,X(1,I),X(2,I),X(3,I)
c   enddo
c   WRITE(*,*) ' печать КООРД. узла N=569 ПО 1-ОМУ НАПР.'
c   WRITE(*,880) NUX,X(1,569),X(1,570)
c
c**      WRITE (*,*) ' BEFOR CALL PRDANU: END 3'
c
      call prdanu(nf,x,nux)
c
      WRITE(*,*) ' after call prdanu: end 3'

```

```

C**      do i=1,nux
C**      WRITE(*,781) i,x(1,i),x(2,i),x(3,i)
C**      enddo
C      WRITE(*,*) ' друк КООРД. вузла N=569 ПО 1-ОМУ НАПР.'
C      WRITE(*,880)NUX,X(1,569),X(1,570)
C 880 FORMAT( /5x,i10,2d13.6)
C
C      ОБЧИСЛЮВАННЯ СУМАРНОГО ОБ'ЄМУ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ
C
C      WRITE(*,*) ' VICH.SUMARNOGO OBEMA NODELI '
C      SUMOB=0.D0
C      DO NU=1,NUX,2
C      IF(.NOT.TELO(NF(NU)))GO TO 111
C      JN14=NU
C
C      CALL PNT
C      CALL METRDG(X,NUX,0,0)
C
C      SUMOB=SUMOB+DET
C*      WRITE(*,112) NU,DX(1),DX(2),DX(3),DET
111 CONTINUE
C      ENDDO
112 FORMAT( /1x,I6,4D14.7)
C      SVMGD=SUMOB*rom
C      WRITE(*,*) ' SUMOB= '
C      WRITE(*,113) SUMOB
C      WRITE(*,*) ' SVMGD= '
C      WRITE(*,113) SVMGD
113 FORMAT(7x,D14.7)
C
C      return
C      end

subroutine anzpld(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2)
C
C 02.04.2016 Дубик Олександр Миколайович
C
C Підпрограма формування поля признаков NFP(nux), що визначають
C границі чисто-пружних зон(CE) і пружнопластичних,
C підпрограма, що організує аналіз НДС за критеріями текучості
C Мізеса, Друккера, Кулона-Мора та ін. в кінці ітераційного процесу за Ньютоном
C -Канторовичем, коли досягнуто рівноваги для зафіксованого
C на попередньому кроці поля признаков зон(CE) текучості -NFP(nux),
C підпрограма аналізу зон розвитку пластичних деформацій для сумарного
C поля напружень -попередніх напружень плюс приріст напруже -у кінці n-ого
C кроку продовження за параметром після обчислення сумарного поля при-
C ростів переміщень -U1(3,nux)
C
C      implicit real*8(a-h,o-z)
C      logical norebr,cmetr,rn0,rnzero,telo,zakr,itfend
C
C      dimension odk(nux),nfp(nux)
C      dimension p(m),nf(nux),x(3,nux),u(3,nux)
C      1,u1(3,nux),wm(1),filg(18,nux2)
C
C***
C      common/itfend/itfend
C***
C      common/pi/pi
C      common/PLAFUN/plfu
C      logical plfu
C
C      common/dls0/dls0
C      common/lode/lode

```

```

logical lode

common/PARGRU/fitr,tagg,udvc,metal,grunt
logical metal,grunt
C
logical metalz,gruntz
C
common/gruvst/tgut(99),vzc(99)
C
common/incriv/indvl(99)
C
common/sdolin/sdol10,sdol11
C
C*****
common/POLUTR/futr(4288)
C
common/GRUPAR/fVtr(99),fotr
C*****
common/PLADEF/inprip,inshap,incrit,plamiz,pladru,placul
logical plamiz,pladru,placul
common/CRITPL/SENVN
logical senvn
common/EHTPL/est0,eht0,estv(99),ehtv(99)
C
common/parlod/betav,dzeta,dzita
C
common/alode/alod
C
common/devstr/dso(3,3),dsl(2,2),ds2(2,2),ds3(2,2),dds(3)
common/svesc/svdso(3,3)
common/sinkvs/sink
C
common/betalf/beta,alfa
C
common/ipovn/ipovs
logical ipovs
C
common/pavfzm/vtv0,vtv(99)
C
common/one/nms,nst,nsl,irab
1,jn14,jn15,jn17,jn18,jn23,jn24,jn26,jn27
2,afin,det,get,g1,g2,a(3,2),cof(3,3,27)
3,ck(3,3),cn(3,3),gn(3,3),els(9,3,3),fn(3,3,3)
common/pavkl/ge(99),gv(99)
common/rav/qra,qbez,norebr,cmetr
common/spusk/rus,rqs,dspus,nspus,is,js
common/kvnev/ri,r0,epn,r
common/nelinf/itr,itv,itc,itf,dqr,qrf,qrk,sdinp,eps,rj,cikl,prgs
common/almark/itvk0,itvkl,fcrl(10),repl,itvm
logical cikl,prgs
common/rnev/rn(3,8),rn0,rnzero
c
call obnul(u,3*nux,0,0)
cmetr=.false.
C*
C
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)write(*,*) '          PARAMETRY
C**      * FYNKCII LODE-NADAI '
C
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0)
C**      *write(*,*) ' PARAMETRU TEORII PLASTICHESKOGO TECHENIA '
C*
C**      if(itr.eq.itvm)write(*,*) ' MITKA 1234567890!!!!!! '

```

```

C**      if(plamiz.and.itr.eq.itvm) call prisf(nfp,0.d0,nux,0)
C*
      do nu=1,nux,2
      rnzero=.not.telo(nf(nu))
      if (rnzero) go to 2
      call fspedp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,nu)
C
      nt=ntiv(nf(jn14))
      if(nt.lt.1)go to 5
      g1z=g1
      g2z=g2
      vtv0z=vtv(nt)
      taggz=tagg
      udvcz=udvc
      fitrz=fitr
      fotrz=fotr
      est0z=est0
      eht0z=eht0
      metalz=metal
      gruntz=grunt
      g1=ge(nt)
      g2=gv(nt)
      tagg=tagg(nt)
      udvc=vzc(nt)
      fitr=fVtr(nt)
      fotr=fVtr(nt)
      est0=estv(nt)
      eht0=ehtv(nt)
C
C**      if(indvl(nt).eq.0)metal=.true.
C
      metal=indvl(nt).eq.0
      grunt=indvl(nt).gt.0
5 continue
C
C**      if(nu.eq.1189.or.nu.eq.1211)write(*,*)' NU=1189,NU=1211,
C**      *metal,grunt,lode,nt,indvl '
C
C**      if(nu.eq.1189.or.nu.eq.1211)write(*,193) metal,
C**      *grunt,lode,nt,indvl(nt)
C
C**      if(nu.eq.1213.or.nu.eq.1221)write(*,*)' NU=1213,NU=1221,
C**      *metal,grunt,lode,nt,indvl '
C
C**      if(nu.eq.1213.or.nu.eq.1221)write(*,193) metal,
C**      *grunt,lode,nt,indvl(nt)
C**      if(nu.eq.2277.or.nu.eq.2279)write(*,193) metal,
C**      *grunt,lode,nt,indvl(nt)
C
      193 format( 3x,3l10,2I10)
C
C**      if(nu.eq.419.or.ny.eq.453)write(*,*) ' NU , ALFA ,SDO10!!!! '
C**      if(NU.EQ.487.or.nu.eq.491)write(*,*) ' MITKA!!!!!!!!!!!!!! '
C**      78 continue
C**      if(nu.eq.1)write(*,29) NU,ALFA,SDO10
C
      call devstn(odk,nux,filg,nux2,.false.)
C
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)write(*,*)
C**      *' DSO(1,1),DSO(2,2),DSO(3,3),DSO(2,3),DSO(1,2),DSO(1,3) '
C
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)write(*,22) jn14,dso(1,1),
C**      *dso(2,2),dso(3,3),dso(2,3),dso(1,2),dso(1,3)
C**      22 format( i6,6d12.4)

```

```

C
C**      if(nu.eq.425)write(*,*) ' PAST DEVSTN '
C**      if(nu.eq.425)write(*,*) ' NU , ALFA, SDO10!!!! '
C**      if(nu.eq.425)write(*,29) NU,ALFA,SDO10
C**      29 format( 1x,I10,2d13.5)
C
C
C      pinsin=dsqrt(1.50d0*sink)
C
C      pnsin0=1.50d0*sink
C
C      if(senvn)pinsin=dsqrt(sink)
C
C
C      piest=est0+eht0*odk(nu)
C      piestd=piest**2
C      pipla=eht0*odk(nu)
C      piestg=1.0d0/3.0d0*sdo10*tagg
C      piplag=udvc
C
C      if(grunt)go to 14
C
C      if(metal.and.lode)go to 32
C
C      funmiz=3.0d0/2.0d0*sink-(est0+eht0*odk(nu))**2
C
C      if(metal.and.senvn) funmiz=sink-piestd
C      go to 35
C
C      32 continue
C      funmiz=3.0d0/2.0d0*sink*dcos(alod)**2-piestd
C
C      35 continue
C
C      go to 15
C
C      14 continue
C
C      if(grunt.and.lode)go to 31
C
C**      funmiz=3.0d0/2.0d0*sink-(1.0d0/3.0d0*sdo10*tagg-udvc)**2
C
C      pestg0=- (1.0d0/3.0d0*sdo10*tagg-udvc)**2*dsqrt(3.00d0)*
C      *DCOS(fotr)
C
C      funmiz=3.0d0/2.0d0*sink+pestg0
C
C**      pestg0=(1.0d0/3.0d0*sdo10*tagg-udvc)**2
C
C      go to 13
C
C
C      31 continue
C      funmiz=3.0d0/2.0d0*sink*(dcos(alod)-
C      *1.0d0/dsqrt(3.0d0)*dsin(alod)*dsin(fitr))**2-
C      *(1.0d0/dsqrt(3.0d0)*sdo10*dsin(fitr)-
C      *dsqrt(3.0d0)*udvc*dcos(fitr))**2
C
C      13 continue
C
C      **Обчислення максимального кута орієнтації повних
C      напружень до головних площадок
C
C      if(itr.ne.itvm)go to 194

```

```

C
C**      sifa=dsqrt(2.0d0*sink/sdo10**2)/3.0d0
C**      sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo10-2.0d0*udvc/tagg)**2)
C**      sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo10-udvc/tagg)**2)
      sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo11-udvc/tagg)**2)
C
C**      sifa=dsqrt(2.0d0/3.0d0*sink/(sdo10-udvc/tagg)**2)
C
C**      if(sifa.ge.0.99999d0)sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo10+udvc/
C**      *tagg)**2)
      if(sifa.ge.0.99999d0)sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo11+udvc/
      *tagg)**2)
C
C**      if(sifa.ge.0.99999d0)sifa=dsqrt(sink/2.0d0/(sdo10+2.0d0*udvc/
C**      *tagg)**2)
C
C***      if(sifa.ge.0.99999d0)sifa=dsqrt(2.0d0/3.0d0*sink/(sdo10+udvc/
C***      *tagg)**2)
C
      futr(nu)=dasin(sifa)
C
C**      if(nu.eq.1057.or.nu.eq.2213) write(*,195) nu,sink,
C**      *sdo10,sifa,futr(nu),dso(2,2),dso(3,3),dso(2,3)
C
C**      if(nu.eq.1057.or.nu.eq.1059.or.nu.eq.1063.or.nu.eq.1065.
C**      *or.nu.eq.1073.or.nu.eq.1135.or.nu.eq.1195.or.nu.eq.1197.
C**      *or.nu.eq.1199) write(*,196) nu,futr(nu),sifa
C**      if(nu.eq.1949.or.nu.eq.1951.or.nu.eq.2015.
C**      *or.nu.eq.2017.or.nu.eq.2081)write(*,196) nu,futr(nu),sifa
C**      if(nu.eq.2085.or.nu.eq.2151.
C**      *or.nu.eq.2153.or.nu.eq.2213.or.nu.eq.2219.or.nu.eq.2303.
C**      *or.nu.eq.2305.or.nu.eq.2307)write(*,196) nu,futr(nu),sifa
C
      196 format(2x/I10,2d13.5)
C
      195 format( 3x,I10,7d13.5)
C
C
      194 continue
C
      15 continue
C
C*      if(.not.itfend)go to 41
C
C**      if(nu.eq.5)write(*,*) ' SUBROUT.ANZPLD '
C**      if(nu.eq.5)write(*,*) ' NU= ,PINSIN= ,PIEST= ,PIPLA= ,
C**      *,FUNMIZ= '
C**      if(nu.eq.5)write(*,*) ' ODK(NU)= , BETA= , ALFA= '
C**      write(*,248) nu,pnsin0,pestg0,piplag,funmiz,sdo10
C**      *,odk(nu),beta,alfa
C*      41 continue
C
      izpnpf=nfp(nu)
C*****
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.nu.eq.549)write(*,*)
C**      * ' NU=549 ,BEFOR '
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.nu.eq.549)write(*,191)
C**      * nu,nfp(nu),funmiz
C**      191 format( 1x,2i10,d12.5)
C*****
C
      if(funmiz.LE.1.00D-27)go to 6
C
      nfp(nu)=110

```

```

C
C*****
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.nu.eq.549)write(*,*)
C**      * ' NU=549 ,AFTER ,METKA 1 '
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0.and.nu.ge.700)write(*,191)
C**      * nu,nfp(nu),funmiz
C*****
C
C**      if(itr.eq.14.and.nu.eq.419)write(*,*) ' METKA 1110, NU= ,NFP= '
C**      if(itr.eq.14.and.nu.eq.419)write(*,89) itr,nu,nfp(nu)
C**      89 format( /1x,3i10)
C
      if((nfp(nu)-izpnfp).ne.0)inprp=inprp+1
C
      6 continue
C
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)write(*,37) nu,alod,betav,
C**      *dzeta,dzita,funmiz,sd010
C
C**      37 format( i6,6d12.4)
C
C*****
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.nu.eq.549)write(*,*)
C**      * ' NU=549 ,AFTER ,METKA 1 '
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.nu.eq.549)write(*,191)
C**      * nu,nfp(nu),funmiz
C*****
      if(nt.lt.1)go to 3
      g1=g1z
      g2=g2z
      vtv0=vtv0z
      tagg=taggz
      udvc=udvcz
      fitr=fitrz
      fotr=fotrz
      est0=est0z
      eht0=eht0z
      metal=metalz
      grunt=gruntz
C
C**      if(nu.eq.1213.or.nu.eq.1221)write(*,*) ' NU=1213,NU=1221,
C**      *metal,grunt,lode,nt,indvl '
C**      if(nu.eq.1213.or.nu.eq.1221)write(*,193) metal,
C**      *grunt,lode,nt,indvl(nt)
C
      3 continue
C*****
C*      if(itr.eq.30.and.inshap.eq.1)write(*,91) nu,nfp(nu),pinsin,
C*      *piest,pipla,funmiz
C**      if(itr.eq.itvm.and.inshap.eq.0.and.incrit.eq.0)write(*,91)
C**      * nu,nfp(nu),pinsin,piest,pipla,funmiz
C**      91 format( 1x,2i10,4d12.5)
C*****
C
      2 continue
C
      enddo
C
      if(.not.plfu)go to 17
C
      write(*,*) ' Pechate POLEY uglov orientacii sdviga masiv FUTR '
C
      do i=1,nux,2
C

```

```

        gradus=180.0d0/pi*futr(i)
C
        write(*,179) i,futr(i),gradus
C
        enddo
C
179 format( 3x,i10,2d13.5)
C
17 continue
C
        INCRIT=INCRIT+INPRIP
C
C** 248 format( /5x,I10,4d13.5,/3x,4d13.5)
C
C**      На печать
C**      write(*,*) ' Test vuchislenia ugla 30 grad cherez
C**      * obr.trigonom.funkciy. z dvojnoy tochnostiu '
C
C**      ug30=dasin(0.50d0)
C**      ugrad=180.0d0/pi*ug30
C
C**      write(*,197) ugrad
C** 197 format( 3x,d13.5)
C
C
        return
        end

        subroutine zagou(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
1,n3,xe,ue,ule,neqd)
C
C      Розділ zagoul.f
C
C      керуюча підпрограма вітки УСТОС
C      для розв'язання задачі в МОЗУ (з підключенням або без підключення
C      одновісності)
C
C      05.06.14 - for MS DOS (PC PENTIUM IV -2400), FORTRAN-77
C      04.08.2015 - Дубик О.М.
C
C      **Реалізовано алгоритм пружно-пластичного деформування
C      твердого тіла з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності
C      у поєднанні з методами продовження за параметром і Ньютона-Канторо-
C      вичу з реалізацією внутрішнього ітераційного процесу постулатів
C      стійкості Друккера-Прагера і Кулона-Мора,теорії пластичної текучості
C      зі зміцненням на основі критерію Мізеса
C      З підключенням гілки з головною підпрограмою SHENMP
C
C
        implicit real*8(a-h,o-z)
        logical onlydn,id,ctor,geolin,obxsg,fors,memor,norebr,smetr
1,seq,open,back,clos,cont,cikl,prgs,telo
C
        common/ISTRAV/IST,IST2,IS3D,IZPV
C
        common/ploskd/vv00,plod
        logical plod
C
        common/PLADEF/inprip,inshap,incrit,plamiz,pladru,placul
        logical plamiz,pladru,placul
        common/EHTPL/est0,eht0,estv(99),ehtv(99)
C
        common/PARGRU/fitr,tagg,udvc,metal,grunt
        logical metal,grunt

```



```

C
common/gruvst/tgut (99), vzc (99)
common/incriv/indvl (99)
C
COMMON/ODKVIS/odk (4300)
common/PRZNFP/nfp (4300)
C
коректувати          M1 x M2 x M3 = 2 x 43 x 50 = 4300
C
common/polosn/poli, dpoli, polik
common/dpolos/dpoli0
common/sosul/isk31, isk32, isk33, isk34, qus1, qus2, qus3, qus4
C*
common/polosd/polid, dpolid, polidk
common/sosuld/isd31, isd32, isd33, isd34, qusd1, qusd2, qusd3, qusd4
C*
dimension p(m), nf(nux), x(3, nux), u(3, nux)
1, ul(3, nux), wm(1), filg(18, nux2)
dimension xe(neqd), ue(neqd), ule(neqd)
common/doprel/r10, dr10, r10t
c
common/nbsek/nb0
c
COMMON/NKSETU/NK1(3), NK2(2)
common/dims/m1, m2, m3
common/obm/inzap, nzap, inf, nr, ar(1)
common/parsr/prr, dpr, prrk, napn
common/one/nms, nst, nsl, irab
1, jn14, jn15, jn17, jn18, jn23, jn24, jn26, jn27
2, afin, det, get, e, v, a(3, 2), cof(3, 3, 27)
3, ck(3, 3), cn(3, 3), gn(3, 3), els(9, 3, 3), fn(3, 3, 3)
common/pi/pi
common/kvnev/ri, r0, epn, r
common/onlydn/onlydn /ind/id(30) /ctor/ctor
common/geolin/geolin, obxsg /rfors/fors /memor/memor
c
common/rav/gra, qbez, norebr, cmetr
c
common/files/nfl(10), izp(10), nzp(10), ifl(10), nm(10)
1, seq(10), open(10), back(10), clos(10), cont(10)
c
common/ene/eniz, enmem, enp, enpl, endis, envs, enpot, enkin, env1, env2
c
common/zamuar/fgx, fgy, fgz, cgx, cgy, cgz, cuv, nrmr, nrprm, nacm, intu
1, nstm, nfmt, minl, nfic, aky, akz, mupm(20), apm(5, 20), cuf(20), mrpd(20)
2, rdi(4), idi(4), trdi(20, 20), tidi(20, 20)
c
common/nelinf/itr, itv, itc, itf, dqr, qrf, qrk, sdinp, eps, rj, cikl, prgs
common/avtoch/epmax, cymen, cymens, cyvel, ogrv, itmin, itsr, itmax
common/prpac/pr(10), pac(30), kpc(10), npr, npac, nkpc
common/det1/demin, isign, jstep, cmax, cmin
common/spusk/rus, rqs, dspus, nspus, is, js
common/rona/rona, amash, qr1, dsp
common/bazus/mbaz, kbaz(50, 2)
common/ansvi/ans
logical ans
common/plt/rom
common/dparo/dgm, cgm, itrg, itps, cuvqrs, dqr2e, ad0, adp,
* itru2, itru3, rezp0, rezpl, izsh, itrpr, itrpk
common/paros/ei, vi, eic, gmu, skm, epn1, prio, ios, indo, itros, izr(2, 2)
common/memis/imo, iske
logical ios, imo, prio, indo, rezp0, rezpl
common/silotp/qro, dqro, qd0, qdp, itopl
logical itopl
common/ipovn/ipovs

```

```

logical ipovs
common/almark/itvk0,itvk1,fcrl(10),repl,itvm
C
common/parnas/qsn, qsv, qsk1, qsk2, qvd, qal, qsa1, qsa2, qsa3,
* sq1, sq2, sq3, qrl, qdn,
* dqsv, dqsk1, dqsk2, dqvd, dqdn, dsq1, dsq2, dsq3, dqrl,
* cpl(20), atf(20)
C
common/inprif/ifpri
logical ifpri
common/zapovs/povz(2,9)
C !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
common/urek/u2(3,4300)
common/uskor/u3(3,4300)
C !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
C
C запис даних для графічної обробки в файл :
C*** open(13,file='graphics',status='unknown',form='formatted')
C
C запис у файл прямого доступу:
open(15,file='fort.15',status='unknown',form='unformatted')
C*** open(15,file='fort.15',status='unknown',
C*** * access='direct',recl=65528,form='unformatted')
C
open (31,file='f_PoleX',status='unknown',form='unformatted')
C
C!!!! запис у файл послідовного доступу:
open(16,file='fort.16',status='unknown',form='unformatted')
C
open (32,file='f_PolNF',status='unknown',form='unformatted')
open (33,file='f_RSO',status='unknown',form='unformatted')
open (34,file='f_Coord',status='unknown',form='unformatted')
open (35,file='f_S_max',status='unknown',form='unformatted')
open (36,file='f_S_min',status='unknown',form='unformatted')

pi=4.d0*datan(1.d0)
C
розміри сіточної області| M1=2; M2=43; M3=50
nms=nux
nst=m1
nsl=m1*m2
WRITE (33,287) M2,M3
287 FORMAT( 'RAZMER SETKI'/I4/I4)
C
write (*,919) m, nux, itr
919 format (/ ' m, nux, itr : ', 3i7 /)
C
C*** write(*,*) ' VARIANT SOLUSHN BEZ GIDROSTATICHEK.NAGRUZKI-27 '
C*** write(*,*) ' VARIANT SOLUSHN -- SNEG S ODNOY STORONU-27 '
C*** write(*,*) ' VARIANT SOLUSHN -- SO VSEMI NAGRYZKAMI-27 OSNOVA '
write(*,*) ' VARIANT SOLUSHN -- VSE NAGRUZKI BEZ VETRA -27 '
C
itr=0
C
imo=.false.
C
задання вхідних даних
C** WRITE (*,*) ' BEFOR DANOSU !'
C
C* if(plamiz) go to 53
C
C* call danosu(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
C* 1,xe,ue,ule,neqd)
C* go to 54

```

```

C* 53 continue
   call danosp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
1,xе,ue,u1e,neqd)
C* 54 continue
C
C**      write (*,*) ' After DANOSU !metka1 '
C
C   запис полів вихідних координат і попереднього напруження в робочий файл
C
   write (16) xе,filg
   write (*,*) ' AFTER FORT 16 !'
C
C*   поле попереднього напруження відсутнє
   fors=.false.
   if (.not.fors) go to 31
C
C   формування поля попередніх напружень від поля початкових
C   відхилень U1
C
   memor=.true.
   do 32 nu=1,nux,2
   if (telo(nf(nu)))
*call fspedp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,nu)
32 continue
   memor=.false.
C
C   контроль вхідних даних
C
31 continue
   rdi(3)=u1(js,is)
   idi(1)=itr
   idi(2)=is
   idi(3)=js
C
   if(napn.eq.0) qra=dqr2e
   if(napn.eq.0) poli=polik
C
C*   if(napn.eq.0) polid=polidk
C
C*****
   if(ipovs) zsql=sql
   if(ipovs) sql=sql+dsql
C
   if(ipovs) zqsk1=qsk1
C***!!!   if(ipovs) qsk1=qsk1+dsql
   if(ipovs) qsk1=qsk1+dqsk1
C
   if(ipovs) zqvd=qvd
   if(ipovs) qvd=qvd+dqvd
   if(ipovs) zqdn=qdn
   if(ipovs) qdn=qdn+dqdn
C
   if(ipovs) sq2=qus2
   if(ipovs) sq3=qus3
   if(ipovs) itr=1
C*****
C**      write (*,*) ' BEFOR PDANGP QDN= ,QVD= !!!'
C**      write (*,437) ZQVD,ZQDN,QVD,QDN
C** 437 FORMAT( 2x, 4D13.5)
C
   call pdangp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2)
C
C**      write (*,*) ' AFTER PDANG1 !'
   if(napn.eq.0) qra=0.d0

```

```

        if(napn.eq.0) poli=0.d0
C*****
C*      if(napn.eq.0) polid=0.d0
C*****
        if(ipovs) sql=zsqr1
C**      if(ipovs) dsqr1=0.0d0
C
        if(ipovs) qsk1=zqsk1
C**      if(ipovs) dqsk1=0.0d0
C
        if(ipovs) qvd=zqvd
        if(ipovs) qdn=zqdn
C
        if(ipovs) sq2=0.d0
        if(ipovs) sq3=0.d0
        if(ipovs) itr=0
C
C**      write (*,*) ' PAST PDANGP QDN= ,QVD= !!!'
C**      write (*,437) ZQVD,ZQDN,QVD,QDN
C
C*****
C
        if (onlydn) return
C
C      коректування поля X додаванням поля початкових відхилень U1
C
        if (.not.fors) go to 34
        do 33 i=1,neqd
        xe(i)=xe(i)+ule(i)
        ule(i)=0.d0
33 continue
C
34 continue
        fors=.true.
        qrk=qra+dqr2e
        qra=0.d0
C
C      продовження задачі з контрольної точки
C
        if (.not.ctor) go to 1
C
        call vixzap(x,neqd,filg,18*nux2,u1,neqd,pac,30,u3,neqd,
* povz,18,nfl(4))
        ctor=.false.
C
        enmem=pac( 1)
        eniz =pac( 2)
        rqs  =pac( 3)
        itr  =pac(11)
        nspus=pac(12)
        dsp  =pac(13)
        qr1  =pac(14)
        amash=pac(15)
        rona =pac(16)
        is   =pac(17)
        js   =pac(18)
        qra  =pac(20)
        dspus=pac(21)
C
        call dqzap(.false.)
C *****
C
        nspus=0
C

```

```

        if(itr.gt.napn+1) prr=0.000d0
        if(itr.le.napn ) qra=rqs
c
        if(itr.eq.napn.or.itr.ge.napn+itru2+1) dspus=0.d0
c
        if(rezp0) go to 8
        if(nspus.eq.1) ul(js,is)=dspus
1   qrf=qrk
        nb0=nsec(0)
c
c   запис даних для графічної обробки в файл :
c
c**      igrp=izsh-itr
c**      write(13,*) ' GridXYZ: 1, 2, ', igrp
c**      write(13,*) ' Coordinates:'
c
c   АЛГОРИТМ МЕТОДА ПОСЛІДОВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
c
12  continue
        itr=itr+1
        pr(2)=nspus
        if(itr.gt.napn) go to 13
        if(id(10)) dspus=-dspus
        id(10)=.false.
c
c*      dqr=qra
c*      call shenml(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,
c*      ,xe,ue,ule,neqd)
c
        if(.not.ipovs) go to 1220
        call corus0(ul,ul,nux,neqd)
c
1220 continue
c
        id(11)=.false.
c*****
        id(11)=.true.
c****  ПРЯМИЙ ДОСТУП
c        seq(4)=.false.
c        back(4)=.false.
c        seq(5)=.false.
c        back(5)=.false.
c****  ПОСЛІДОВНИЙ ДОСТУП
c        seq(4)=.true.
c        seq(5)=.true.
c ???  close(5)=.false.(default) - if close(5)=.true. -> nzp=1
c*****
        call voidp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
c
        if(itr.eq.izsh) go to 8
c
        go to 12
c
13  continue
        cont(5)=.true.
        if(itr.gt.napn+itru2+1) go to 21
c
c   АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ МЕТОДОМ НЬЮТОНА-КАНТОРОВИЧА
c   1-е уточнення розв'язання етапу 1
c
        if(napn.eq.0) go to 1344
c
        if(itr.eq.napn+1) qra=rqs

```

```

        if(itr.eq.napn+1) dspus=0.d0
1344 continue
c
        itsh2e=0
c
        2 continue
C**      if (dabs(qra).gt.dabs(qrk)) go to 21
        if (id(10)) dspus=-dspus
        id(10)=.false.
        pr( 2)=nspus
C**      if(itr.eq.napn+itru2+2) go to 21
c
c***      epn=epn/1.d1
        dqr=qra
c
        if(itru2.eq.0) go to 121
        itsh2e=itsh2e+1
c
C****      write (*,178)itsh2e,itru2,napn,itr
C****      178 format(/' Параметри продовж. за dqr2e: ',4x,'itsh2e',5x,
C****      * 'itru2',6x,'napn',7x,'itr', / 30x,4i10)
        121 continue
c
        if(.not.ans) go to 40
        call corasf(nf,nux)
        40 continue
c
C*****
C      **Алгоритм продовження за параметром відшукування
C      **урівноважених станів трансформувемих розрахункових моделей
C      **включення змінюваної порожньої
C
C      **IS3D-параметр сіткової координати за 3-м напрямом
C
        if(itr.le.izsh)go to 419
c
C*      do inu0=1,nux
C*      nfp(inu0)=0
C*      enddo
c
C*      incrit=0
c
C*      IST=IST+IS3D
C*      II3=M3-IST
C*      CALL TELOS(nf,nux,1,II3,IST2,m3,1)
C*      INSU=nuzl(1,1,ii3)
C*      IKSU=nuzl(1,IST2,m3)
C*      nuans=nuzl(1,ist2,ii3)
C*      if(ii3.eq.25)nf(nuans)=nf(nuansхунко)-2
C*      if(ii3.eq.21)nf(nuans)=nf(nuans)-2
C*      if(ii3.eq.17)nf(nuans)=nf(nuans)-2
C*
C*      if(ii3.eq.25)write(*,*) ' II3= ,NUANS= ,NF(NUANS)= '
C*      if(ii3.eq.25)write(*,289) ii3,nuans,nf(nuans)
C*
C*      if(ii3.eq.21)write(*,*) ' II3= ,NUANS= ,NF(NUANS)= '
C*      if(ii3.eq.21)write(*,289) ii3,nuans,nf(nuans)
C*
C*      if(ii3.eq.17)write(*,*) ' II3= ,NUANS= ,NF(NUANS)= '
C*      if(ii3.eq.17)write(*,289) ii3,nuans,nf(nuans)
C*
C*      289 format( 3i10/)
C*
C*      write(*,*) ' ITR=, IST= ,IST2=,IZPV=,INSUPL=,IKSUPL= '

```

```

C*
C*      write(*,288) ITR, IST, IST2, IZPV, INSU, IKSU
C* 288 format ( 6i7/)
C*      if(itr.eq.izpv) call prisf(nf,0.d0,nux,0)
C*
      419 continue
C*****
C*      if(plamiz) go to 51
C
C*      call shenm(p,m,nf,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
C*      1,xe,ue,u1e,neqd)
C*      go to 52
C* 51 continue
C
C****      write(*,*) ' BEFOR SHENMP '
C
      call SHENMP(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2
      1,xe,ue,u1e,neqd)
C
C* 52 continue
C
      write (0,*) '
      write (0,*) ' ITR = ', itr
      write (0,94) (pac(i),i=19,24)
      write (0,94) (pac(i),i=25,30)
94 format (1x,d12.5,5d13.5)
      call prstream(1)
c***      write (0,*) ' Параметри поверхневих навантажень '
95 format (1x, 7f10.4)
      write (0,*) ' qsn, qsv, qsk1, qsk2, qvd, qal, qsa1 '
      write (0,95) qsn, qsv, qsk1, qsk2, qvd, qal, qsa1
      write (0,*) ' qsa2, qsa3, sql, sq2, sq3, qrl, qdn '
      write (0,95) qsa2, qsa3, sql, sq2, sq3, qrl, qdn
      write (0,*) ' dqsv, dqsk1, dqsk2, dqvd, dqdn, dsq1, dsq2 '
      write (0,95) dqsv, dqsk1, dqsk2, dqvd, dqdn, dsq1, dsq2
      write (0,*) ' dsq3, dqrl '
      write (0,95) dsq3, dqrl
      call prstream(2)
c***      write (0,*) ' Максимальне і мінімальне значення МЖ: '
      chob=cmax/cmin
      write (0,*) cmax, cmin, chob
C
C      *** Накопичення поля переміщень в масиві U3(i,nux) на
C      ділянках з спеціальними типами навантажень
C      (при реалізації накопичення повного поля переміщень
C      -U3=U3+U1 для всієї дискретної моделі - ця операція
C      дає помилку - подвійне накопичення U1 на ділянках
C      спеціальних типів навантажень типу - 5 і 6)
C
C*****      if(.not.ipovs) go to 1221
C*****      call corus0(u1,u1,nux,neqd)
C
C***** 1221 continue
c***      if(napn.eq.0.and.itr.le.itru2) go to 201
C
      id(11)=.false.
      call vovidp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,u1,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
C
      cont(5)=.false.
C
      201 continue
C
C !!! коментувати, якщо рахується до останнього кроку
C

```

```

      if(ifpri.and.itr/itvm*itvm.eq.itr) go to 8
c
C****      if(itr.eq.izsh) go to 8
c
c
      itr=itr+1
      if (.not.id(17)) go to 2
c
21 dspus=0.d0
c
      epn=epn/1.d2
      pr(2)=nspus
c
c      коректування звязків
c
      if(.not.ans)go to 29
c
      call corans(nf,nux)
c
C****      write (*,181)itru2,itru3,napn,izsh,cuvqrs
C****      181 format(/'відладочний друк (після corans): ',5x,'itru2',
C****      * 5x,'itru3',6x,'napn',6x,'izsh',6x,'cuvqrs', / 35x,4i10,d13.5)
c
      29 continue
      if((cuvqrs-1.d0).lt.1.d-9) go to 120
      dqr3e=qra*(cuvqrs-1.d0)
      itd=0
      if(itru3.ne.0) itd=1
      qra=qra+dqr3e*(itr-napn-itru2-1-itru3-itd)
c
C****      write (*,180)qra,dqr3e
C****      180 format( /' Збільшення параметру навантажень на 3-му етапі: ',
C****      * 5x,'qra',12x,'dqr3e', / 45x,2d13.5)
c
      120 continue
c
c      Приклад еволюції зміни значень параметру "itru3"
c      тільки при продовженні за типом зміни анкерних
c      звязків в "corans"
c
c      itr=napn+itru2+1 -> itru3=0 при зчитуванні запису в кінці
c      2-го етапу і продовженні зчитування за 1-м стандартним
c      типом анкер. звязків
c      itr=napn+itru2+2 -> itru3=1 зчитування проміжних ре-
c      зультатів 3-го етапу і продовження за 2-м типом анкер-
c      них звязків
c      -> itru3=0 якщо зміни типу анкерних
c      звязків відсутні
c      itr=napn+itru2+3 -> itru3=2 продовження коректування
c      анкерних звязків
c      -> itru3=1 нема продовження коректування
c      анкерних звязків
c      і так далі
c
c      У вхідній строчці перед початком рахунку завжди задається
c      itru3=0. При продовженні рахунку "itru3" змінюється у
c      відповідності з приведеною послідовністю
c
      if(itr.gt.napn+2+itru2+itru3) go to 111
      dqr=qra
c
      if(itru3.eq.0) go to 122
C****      write (*,179)itrprrr,itru3,napn,itr
C****      179 format(/' Пар.прод.за умов.анк.зв.:',4x,'itrprrr',5x,

```



```

C****      * 'itru3',6x,'napn',7x,'itr', / 25x,4i10)
c
122 continue
c
c      МЕТОД ДИСКРЕТНИХ ГАЛЬМУВАНЬ
c      Уточнення розв'язків 2-го етапу
c
C*      call shevr(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,
C*      1 xe,ue,ule,neqd)
c
      cont(5)=.true.
      id(11)=.false.
      call vovidp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
c
      cont(5)=.false.
c
111 continue
c
c      КОРЕКЦІЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ З УРАХУВАННЯМ ОДНОВІСНОСТІ.
c      ВИЗНАЧЕННЯ НОВОГО РІВНОВАЖНОГО СТАНУ
c
      imo=.false.
      if(ios) imo=.true.
      if(.not.imo) go to 101
c
102 continue
      if(itr.gt.napn+2+itru2+itru3+itrg) go to 103
      itr=itr+1
c
      cont(5)=.true.
c
103 continue
      itr=itr+1
      gmu=gmu+dgm*(itr-1)
      gm2=gmu**2
      skm=-pi**2*ei/3.d0/gm2
      if(gmu.gt.cgm*1.02d0) go to 101
      if(itrg.gt.itrgk) go to 101
c
C*      call shenos(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,
C*      1 xe,ue,ule,neqd)
C****      write (*,177)itr,gmu,cgm
C**** 177 format(' Шаг продолжения за пар.гиб.: ',6x,'itr', 6x,'gmu',
C****      * 6x,'cgm', / 30x,i10,2d13.5)
c
      id(11)=.false.
      call vovidp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
      id(11)=.false.
      cont(5)=.false.
c
      if(imo) go to 102
c
101 continue
c
c      обробка і видача результатів розв'язку
c
      8 if (.not.id(18)) go to 10
      call londp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2)
      call prisqr(u,nux)
10 do 3 i=1,neqd
      ule(i)=xe(i)
3 continue
      rewind 16
      read (16) xe

```

```

do 9 i=1,neqd
ue(i)=ule(i)-xe(i)
xe(i)=ule(i)
9 continue
obxsg=.false.

c
c   Режим друку проміжних і кінцевих результатів
c   в заданих фрагментах
c
CC*   call viprif(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
c
C***!!   if(ifpri.and.itr/itvm*itvm.eq.itr.and.itr.lt.izsh) obxsg=.true.
C***!!   if(ifpri.and.itr/itvm*itvm.eq.itr.and.itr.lt.izsh) itr=itr+1
c
C***!!   if(ifpri.and.itr.lt.izsh) read (16) ul
C***!!   if(ifpri.and.itr.lt.izsh) go to 2
c*****09.06.2001*****
C*   write (34,*) ' Field coord. def. space'
C*   write (*,*) ' Field coord. def. space'
C*   DO i=1,nux,2
C*   write (34,894) x(1,i),x(2,i),x(3,i)
C*   write (*,894) i,x(1,i),x(2,i),x(3,i)
C*   enddo
C*   894 format (d13.5,d13.5,d13.5)
c*****
c
c   режими друку результаті
c
id(9)=.false.
C*   id(3)=.true.
C*   id(3)=.false.
C*   id(4)=.true.
C*   id(5)=.true.
C*   id(5)=.false.
C*   id(7)=.true.
id(8)=.false.

c
c***   Програма друку для окремого випадку:
c***   call vizols(p,m,nf,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
c
call vishsp(p,m,odk,nf,nfp,x,u,ul,wm,nux,filg,nux2,n1,n2,neqd)
c
555 continue
c
c***   close(13,status='keep' )
close(15,status='keep' )
close(16,status='keep' )
c***   close(15,status='delete')
c***   close(16,status='delete')
c
return
end

SUBROUTINE DEVSTN(ODK,NUX,FILG,NUX2,NULSD)
C
C   20.08.15 - Дубик О.М.
C
C   ПІДПРОГРАМА ОБЧИСЛЕННЯ ТЕНЗОРА-ДЕВІАТОРА НАПРУЖЕНЬ
C   и його розкладання в ряд Маклорена для СЕ з урахуванням
C   пружнопласт.деформ.матеріалу,обчислення коефіцієнтів
C   пружнопластичного тензора -С(е,р) і згортка тензора
C   напружень з прямим тензором перетворення СК,
C   обчислення інваріанту I1(S2)

```

```

C
C   NULSD=.true.-Обчислення тільки компонент тензора-девіатора,
C               його розкладання в ряд и згортка центр.частини
C   NULSD=.false.-Обчислення інваріанта S**S и коеф.С(е,р), який
враховуєпружно-пластичні деформації
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   LOGICAL NULSD
C
C   dimension odk(nux), filg(18,nux2)
C
C   common/dls0/dls0
C
C   dimension rsgk(3,3), rssid(3,3)
C
C   common/PLAZAP/plaza
C   logical plaza
C
C*
C   common/PARGRU/fitr, tagg, udvc, metal, grunt
C   logical metal, grunt
C   common/CRITPL/SENVN
C   logical senvn
C
C   common/sdol1n/sdol10, sdol1
C
C   common/PLADEF/inprip, inshap, incrit, plamiz, pladru, placul
C   logical plamiz, pladru, placul
C   common/nelinf/itr, itv, itc, itf, dqr, qrf, qrk, sdinp, eps, rj,
*cikl, prgs
C
C   common/devsv0/SVG(3,3)
C   common/devstr/dso(3,3), ds1(2,2), ds2(2,2), ds3(2,2), dds(3)
C   common/svesc/svds0(3,3)
C   common/sinkvs/sink
C   common/betalf/beta, alfa
C   common/EHTPL/est0, eht0, estv(1), ehtv(1)
C
C   common/pavfzm/vtv0, vtv(99)
C
C   COMMON/ONE/NMS, NST, NSL, IRAB
1, JN14, JN15, JN17, JN18, JN23, JN24, JN26, JN27
2, AFIN, DET, GET, G1, G2, A(3,2), COF(3,3,27)
3, CK(3,3), CN(3,3), GN(3,3), ELSE(9,9), FN(3,3,3)
C
C   common/lode/lode
C   logical lode
C
C   COMMON/PAVKL/GE(1), GV(1)
C
C   COMMON/REBRO/REBRO
COMMON/DX/DX(3)
COMMON/GKN/GK1(2,2), GK2(2,2), GK3(2,2)
COMMON/DOP/GS(3,3), FS(3,3,3), GK(3,3), PO, GSK(3,3), DETS
C
C   COMMON/FORSTR/FOS
C
C   COMMON/STRED/SDO(3,3), SD1(2,2), SD2(2,2), SD3(2,2), SDS(3)
COMMON/ELSDEK/ELH(9,3,3), ELSH(6,3,2)
1, ELBE(4,4), ELSD(6,3,2), ELSF(6,3,2)
C
C   COMMON/SG12/SG1(3,3), SG2(3,3)
C
C   COMMON/DEFDEK/GRO(3,3), GR1(2,2), GR2(2,2), GR3(2,2), GRS(3)

```

```

C
CALL OBNUL(DSO,9,0,0)
CALL OBNUL(DS1,4,0,0)
CALL OBNUL(DS2,4,0,0)
CALL OBNUL(DS3,4,0,0)
CALL OBNUL(DDS,3,0,0)
CALL OBNUL(SVDSO,9,0,0)
C
call obnul(rsgk,9,0,0)
call obnul(rssd,9,0,0)
C
C Обчислення 1-их інваріантів загального тензора напружень
C і його розкладання в ряд Маклорена в центрі CE
C
if(plaza)go to 66
C
d1s0=0.d0
do i=1,3
do j=1,3
d1s0=d1s0+sdo(i,j)*gk(i,j)
enddo
enddo
sdo10=d1s0
C
go to 67
C
66 continue
C
** Плоска деформація
C
d1s0=0.d0
do i=2,3
do j=2,3
d1s0=d1s0+sdo(i,j)*gk(i,j)
enddo
enddo
C
sdo11=d1s0
C
d1s0=d1s0*(1.0d0+vtv0)
sdo10=d1s0
C
67 continue
C
d1s1=0.d0
d1s2=0.d0
d1s3=0.d0
do i=1,2
do j=1,2
C
i1=i+1
j1=j+1
if(i.eq.1) i2=1
if(j.eq.1) j2=1
if(i.eq.2) i2=3
if(j.eq.2) j2=3
C
d1s1=d1s1+sd1(i,j)*gk(i1,j1)
d1s2=d1s2+sd2(i,j)*gk(i2,j2)
d1s3=d1s3+sd3(i,j)*gk(i,j)
enddo
enddo
C
C Обчислення компонент тензора-девіатора напружень

```

```

C
    if(plaza)go to 68
C
    do i=1,3
    do j=1,3
    dso(i,j)=sdo(i,j)-1.0d0/3.0d0*sdo10*gn(i,j)
    enddo
    enddo
C
    go to 69
C
68 continue
C
    do i=2,3
    do j=2,3
    dso(i,j)=sdo(i,j)-1.0d0/3.0d0*sdo10*gn(i,j)
    enddo
    enddo
C
69 continue
C
Обчислення компонент розкладання тенз.-девіатора.напружень
C
    dk=.5d0
    do i=1,2
    do j=1,2
C
        i1=i+1
        j1=j+1
        if(i.eq.1) i2=1
        if(i.eq.2) i2=3
        if(j.eq.1) j2=1
        if(j.eq.2) j2=3
C
        ds1(i,j)=sd1(i,j)-dk*d1s1*gn(i1,j1)
        ds2(i,j)=sd2(i,j)-dk*d1s2*gn(i2,j2)
        ds3(i,j)=sd3(i,j)-dk*d1s3*gn(i,j)
    enddo
    enddo
C
C
Обчислення 1-ого інваріанта квадрата тензора I1(S2)
C
    IF (NULSD) RETURN
C
    sink0=0.d0
    do i=1,3
    do j=1,3
    do k=1,3
    do l=1,3
    sink0=sink0+dso(i,j)*dso(k,l)*gk(j,k)*gk(i,l)
    enddo
    enddo
    enddo
    enddo
C
Альтернативний варіант обчислення величини SINK0 > SINK00
Згортка DSO і GK
SINK00=0.0d0
C
Вивірочна вставка обчислення довільної функції навантаження
C*****
    do i=1,3
    do j=1,3

```

```

rsgk(i,j)=dso(i,1)*gk(1,j)+dso(i,2)*gk(2,j)+dso(i,3)*gk(3,j)
enddo
enddo
C
do i=1,3
do j=1,3
rssd(i,j)=dabs(rsgk(i,j))
enddo
enddo
C
do i=1,3
do j=1,3
svg(i,j)=rssd(i,1)*gn(1,j)+rssd(i,2)*gn(2,j)+rssd(i,3)*gn(3,j)
enddo
enddo
C*****
C
C Обчислення згортки тенз.-дев. S i C -NSxC
C
do i=1,3
do j=1,3
C** svdso(i,j)=svg(1,i)*ck(j,1)+svg(2,i)*ck(j,2)+
C** *svg(3,i)*ck(j,3)
svdso(i,j)=dso(1,i)*ck(j,1)+dso(2,i)*ck(j,2)+
*dso(3,i)*ck(j,3)
enddo
enddo
C
C** if(jn14.eq.1)write(*,*) ' SUBROUT. DEVSTN '
C** if(jn14.eq.1)write(*,*) ' RSGK= '
C* if(jn14.eq.1)write(*,30) JN14,RSGK
C** 30 format( /1x,I10,4d13.5,/5d13.5)
C
C** if(jn14.eq.1)write(*,*) ' RSSD= '
C** if(jn14.eq.1)write(*,30) JN14,RSSD
C
C** if(jn14.eq.1)write(*,*) ' SVG= '
C** if(jn14.eq.1)write(*,30) JN14,SVG
C
C Згортка RSGK i DSO
C** do i=1,3
C** do j=1,3
C** rssd(i,j)=rsgk(i,1)*dso(1,j)+rsgk(i,2)*dso(2,j)+rsgk(i,3)*dso(3,j)
C** enddo
C** enddo
C
C Згортка RSSD i GK
C** do i=1,3
C** do j=1,3
C** sink00=sink00+rssd(i,j)*gk(i,j)
C** enddo
C** enddo
C
C
C dki1=1.0d0/12.0d0
C dki2=1.0d0/72.0d0
C sink=sink0+dki1*((ds2(1,1)**2+ds3(1,1)**2)*gk(1,1)**2+
C *(ds1(1,1)**2+ds3(2,2)**2)*gk(2,2)**2+gk(3,3)**2*
C *(ds1(2,2)**2+ds2(2,2)**2)+2.0d0*ds3(1,2)**2*gk(1,2)*
C *gk(1,2)+2.0d0*ds2(1,2)**2*gk(1,3)*gk(1,3)+2.0d0*
C *ds1(1,2)**2*gk(2,3)*gk(2,3))
C
C** if(jn14.eq.1.or.jn14.eq.425)write(*,*) ' SINK0= ,SINK= '
C** if(jn14.eq.1.or.jn14.eq.425)write(*,24) JN14,SINK0,SINK

```

```

C** 24 format( /5x,I10,2d13.5)
C
C обчислення коефіцієнту БЕТА і АЛФА при реалізації
C критерія Мізеса ALFA=9*G1**2*beta ---- METAL=.true.
C критерія Треска-Сен-Венана ALFA=4*G1**2*beta ----SENVN=.true.
C
C**      sei=est0+eht0*odk(jn14)
C**      beta=1.0d0/(eht0+6.0d0*g1*sei**2)
C**      if(grunt)go to 14
C
C      beta=1.0d0/(eht0+9.0d0*g1*sink)
C      if(senvn)beta=1.0d0/(eht0+4.0d0*g1*sink)
C
C      go to 13
14 continue
   sgs0=(1.0d0/3.0d0*sdo10*tagg-udvc)**2
C**      beta=1.0d0/(6.0d0*g1*sgs0)
C**      beta=1.0d0/(4.0d0*g1*sink+udvc)
C**      beta=1.0d0/(9.0d0*g1*sink+udvc)
C
13 continue
   alfa=9.0d0*g1**2*beta
C
C      if(grunt)alfa=4.0d0*g1**2*beta
C      if(senvn)alfa=4.0d0*g1**2*beta
C
C**      if(jn14.eq.1.or.jn14.eq.5)write(*,*) ' SUBROUT. DEVSTN '
C**      if(jn14.eq.1.or.jn14.eq.5)write(*,*) ' JN14= ,SINK= ,SGS0= ,
C**      *G1= ,BETA= ,ALFA= '
C**      if(jn14.eq.1.or.jn14.eq.5)write(*,25) JN14,SINK,SGS0,G1,BETA,
C**      *ALFA
C** 25 format( /5x,I10,5d13.5)
C
C      if(.not.lode)go to 1
C
C      call devlod(odk,nux,filg,nux2)
C
1 continue
C**      if(itr.eq.1.and.inshap.eq.0)write(*,2) jn14,dso(1,1),
C**      *dso(2,2),dso(3,3),dso(2,3),dso(1,2),dso(1,3)
C**      2 format( i6,6d12.4)
C
C
C
C      return
C      end

```

## ДОДАТОК Б

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ НЕЖОРСТКОГО  
ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ НА ДІЛЯНЦІ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ КИЇВ-  
КОВЕЛЬ (КМ 297+700 – КМ 302+400)**Розрахунок дорожнього одягу нежорсткого типу**  
**ВБН В.2.3-218-186-2004**

Об'єкт: Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

Режим розрахунку: **нове будівництво**Особливості розрахунку: **перегон****1 Вхідні дані загальні**категорія дороги: **III**кількість смуг руху: **2**номер розрахункової смуги: **1**ширина смуги руху, м: **3.50**ширина узбіччя, м: **2.50**ширина укріплювальної частини узбіччя, м: **0.00**тип дорожнього одягу: **капітальний**розрахункове навантаження: **короткочасне багаторазове**навантаження, КН/ тиск, МПа/ діаметр штамп, см: **115.00 / 0.80 / 34.49**дорожньо-кліматична зона: **У-1**дорожньо-кліматичний район: **II.Р.2**схема зволоження: **1**глибина промерзання ґрунтів, м: **0.01**висота насипу, м: **2.00**строк служби, років: **10**рівень надійності: **0.90****2 Вхідні дані додаткових шарів основи****Робочий шар**тип ґрунту: **Суглинок легкий пилуватий, (J=7-12)2-5мм.<40%**коефіцієнт ущільнення: **0.90****Морозозахисний шар** : не передбачений**Теплоізолюючий шар** : не передбачений**Дренуючий шар** : не передбачений**3 Склад та інтенсивність руху на перший рік експлуатації: не задані****4 Результати приведення до розрахункового навантаження**Приведена добова інтенсивність, прив./смугу: **82**Мінімальний потрібний модуль пружності, МПа: **225.00**

Суммарне розрахункове число прикладань розрахункового навантаження за строк служби

 $\sum N_d$  приклад./смугу: **302417**Потрібний розрахунковий модуль пружності, МПа: **225.00**



## 5 Дані шарів конструкції дорожнього одягу та характеристики

Номер шару	Найменування матеріалу шару	Початкова (мінімальна) товщина, см	Максимальна товщина, см	Крок прирощування, см	Витрати на влаштування 1м2 шару товщиною 1см, грн.см/м2	Модуль пружності для розрахунку Епр., МПа	Езсув, МПа	Ерозтяг, МПа	Нормативний опір розтягу при згині R <sub>o</sub> , МПа	F, град	C, МПа	Кзн.
1	Щільний гарячий асфальтобетон на битумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	5.00	5.00	-	-	3200.00	1800.00	4500.00	9.80	-	-	1.00
2	Щільний гарячий асфальтобетон на битумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	6.00	-	-	-	3200.00	1800.00	4500.00	9.80	-	-	1.00
3	"Холодний ресайклинг" на месте	23.00	-	-	-	800.00	-	-	-	-	-	1.00
4	Щебінь марок 800-1400 осадкових та метаморфічних порід укладений способом заклинювання за ДСТУ Б.В.2.7.-30	3.00	-	-	-	350.00	-	-	-	-	-	1.00
5	Пісок крупний з вмістом глинисто-пилуватої фракції 0%	20.00	-	-	-	130.00	-	-	-	30.55	0.00	1.00
6	Грунт робочого шару - Суглинок легкий пилуватий, (J=7-12)2-5мм.<40%	-	-	-	-	50.00	-	-	-	6.67	0.01	1.00

Потрібний коефіцієнт міцності за пружним прогином: **1.30**

Потрібний коефіцієнт міцності за розтягом на згин: **1.34**

Потрібний коефіцієнт міцності за зсувом: **1.53**

Розрахунковий (отриманий за результатами розрахунку) к-т міцності за пружним прогином **не визначається**

Номер шару	Найменування матеріала шару	Розрахункова товщина шару, см	Загальний модуль пружності за шарами, МПа	Показник міцності, %:		Граничне активне напруження зсуву у шарі, Тгр.	Активне розрахункове напруження зсуву, Т	Розрахункове напруження розтягу у шарі, Gr	Граничне напруження розтягу при згині, Rp	Розрахункова вологість ґрунту, Wp	Вартість, руб/м2
				критерій розрахунку	величина запасу(+/-), %						
1	Щільний гарячий асфальтобетон на битумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	5.00	375.77	-	-	-	-	-	-	-	0.00
2	Щільний гарячий асфальтобетон на битумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	6.00	311.49	розтяг при згині	30.24	-	-	1.667	2.390	-	0.00
3	"Холодний ресайклинг" на месте	23.00	229.77	-	-	-	-	-	-	-	0.00
4	Щебінь марок 800-1400 осадкових та метаморфічних порід укладений способом заклинювання за ДСТУ Б.В.2.7.-30	3.00	82.77	-	-	-	-	-	-	-	0.00
5	Пісок крупний з вмістом глинисто-пилуватої фракції 0%	20.00	75.87	зсув	-111.38	0.007	0.016	-	-	-	0.00



Розрахунок морозозахисного шару не виконувався

Розрахунок дренажного шару не виконувався

Синтетичні матеріали не застосовувались

**Прогноз очікуваного утворення колії, см (додатковий інженерний розрахунок)**

роки	<30‰	30-40‰	41-50‰	51-60‰	61-70‰	71-80‰	>80‰
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
строк служби	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Прогнозування надійності конструкції з врахуванням фактичного розкиду її параметрів**

Критерій	Нормативний рівень	Ймовірний рівень
Пружний прогин	0.900	0.988
Розтяг при згині	0.900	0.956
Зсув	0.900	0.500

## ДОДАТОК В

## ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РОЗПОДІЛ КОЛІСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВІД РОЗРАХУНКОВИХ АВТОПОЇЗДІВ



Рис. В1 Геометричні параметри та розподіл колісних навантажень від автомобіля DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 на задньому візку



Рис. В2 Геометричні параметри та розподіл колісних навантажень від автомобіля DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 на першій та другій осі



Рис. В3 Геометричні параметри та розподіл колісних навантажень від автомобіля DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24 на першій та другій осі



Рис. В4 Виміряна ширина пневматика колеса розрахункового автопоїзда  
DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24

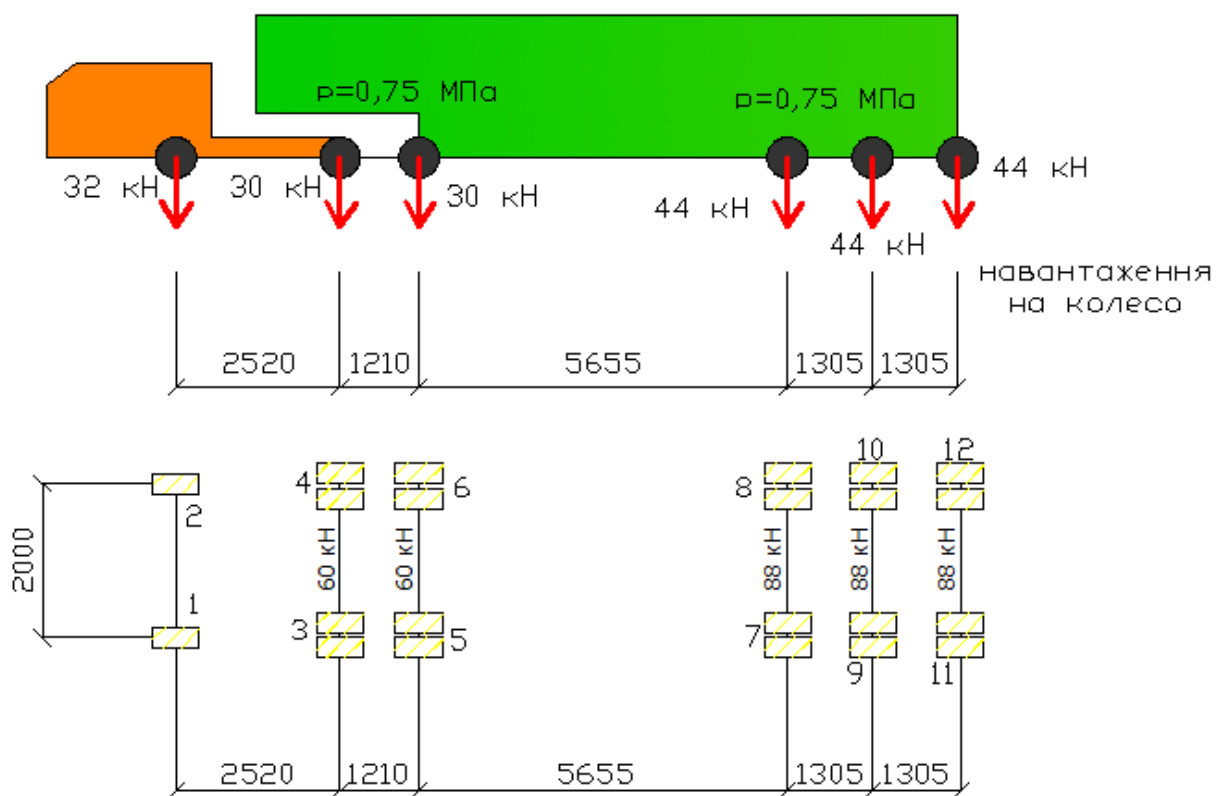


Рис. В5 Схема розстановки коліс автомобіля Мерседес-Бенц  
2632+напівпричеп Кайзер та колісні навантаження

ДОДАТОК Г  
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ НА ДІЛЯНЦІ АВТОМОБІЛЬНОЇ  
ДОРОГИ ЧУГУЇВ – В.БУРЛУК

Таблиця Г1

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого  
дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при  
товщині шару ресайклінгу 7 см

$h_1=0.05$  м;  $h_2=0.07$  м;  $h_3=0.1$  м

$20^\circ\text{C}$ ;  $C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{\text{ср}} = 23.92$ кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1044,3/249,7
2	1620	-1,37/0,1	57,7/4,3	-1039,7/249,8
3	1552	-1,37/0,1	57,7/4,3	-1038,2/250,1
4	1485	-1,37/0,1	57,7/4,3	-1036,8/250,5
5	1418	-1,37/0,1	57,5/4,3	-1035,3/250,8
6	1350	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1033,8/251,1
7	1300	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1032,7/251,4
8	1283	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1032,2/251,5
9	1215	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1030,7/251,8
10	1148	-1,37/0,1	57,5/4,3	-1029,1/252,1
11	1080	-1,37/0,1	57,5/4,3	-1027,5/252,4
12	1013	-1,37/0,1	57,5/4,3	-1025,8/252,7
13	945	-1,37/0,1	57,6/4,3	-1024,1/253,0
14	878	-1,37/0,1	57,7/4,3	-1022,4/253,2
15	810	-1,38/0,1	57,9/4,3	-1020,7/253,5
16	743	-1,38/0,1	58,2/4,3	-1017,1/254,0
17	675	-1,38/0,1	58,2/4,3	-1017,1/254,0
18	540	-1,39/0,1	58,5/4,3	-1013,4/254,5

Таблиця Г2

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 17 см

$h_1=0.05$  м;  $h_2=0.17$  м;  $h_3=0.1$  м

20°C;  $C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 23.43$ кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,37/0,09	57,7/3,8	-590,8/175,8
2	1620	-1,37/0,09	57,9/4,0	-586,0/173,4
3	1552	-1,38/0,1	57,9/4,0	-583,5/172,2
4	1485	-1,38/0,1	58,0/4,1	-581,1/170,9
5	1418	-1,38/0,1	58,1/4,1	-578,6/169,6
6	1350	-1,38/0,1	58,2/4,2	-576,1/168,2
7	1300	-1,38/0,1	58,2/4,2	-574,2/167,2
8	1283	-1,38/0,1	58,2/4,2	-573,5/166,8
9	1215	-1,38/0,1	58,3/4,3	-570,9/165,5
10	1148	-1,39/0,1	58,4/4,4	-568,3/164,1
11	1080	-1,39/0,11	58,5/4,4	-565,6/162,6
12	1013	-1,39/0,11	58,5/4,5	-563,0/161,2
13	945	-1,39/0,11	58,6/4,6	-560,2/159,6
14	878	-1,39/0,11	58,7/4,6	-557,5/158,0
15	810	-1,40/0,11	58,8/4,7	-554,6/156,3
16	743	-1,40/0,11	58,8/4,7	-554,6/156,3
17	675	-1,40/0,11	58,9/4,8	-548,8/152,8
18	540	-1,40/0,12	59,1/4,9	-542,9/148,9



Таблиця ГЗ

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 21 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.21$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 23.31$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,36/0,1	57,4/4,1	-503,6/153,4
2	1620	-1,37/0,1	57,6/4,2	-498,5/151,6
3	1552	-1,37/0,1	57,7/4,3	-495,8/162,3
4	1485	-1,37/0,1	57,8/4,3	-493,2/149,7
5	1418	-1,38/0,1	57,9/4,4	-490,5/148,7
6	1350	-1,38/0,1	58,0/4,4	-487,8/147,7
7	1300	-1,38/0,11	58,1/4,5	-485,7/146,8
8	1283	-1,38/0,11	58,1/4,5	-485,1/146,6
9	1215	-1,38/0,11	58,2/4,5	-482,3/145,4
10	1148	-1,39/0,11	58,3/4,6	-479,5/144,2
11	1080	-1,39/0,11	58,4/4,7	-476,7/143,0
12	1013	-1,39/0,11	58,6/4,7	-473,9/141,7
13	945	-1,39/0,11	58,7/4,8	-470,9/140,3
14	878	-1,4/0,12	58,8/4,9	-468,0/138,9
15	810	-1,4/0,12	58,9/5,0	-465,1/137,4
16	743	-1,4/0,12	59,0/5,1	-462,0/135,8
17	675	-1,4/0,12	59,1/5,2	-450,0/134,2
18	540	-1,41/0,13	59,4/5,4	-452,5/130,8

Таблиця Г4

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 23 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.23$  м;  $h_3=0.1$  мм

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 23.26$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,36/0,1	57,2/4,4	-469,4/143,0
2	1620	-1,36/0,11	57,4/4,5	-464,1/141,5
3	1552	-1,37/0,11	57,5/4,5	-461,4/140,7
4	1485	-1,37/0,11	57,7/4,6	-458,8/139,9
5	1418	-1,37/0,11	57,8/4,6	-456,1/139,0
6	1350	-1,37/0,11	57,8/4,6	-456,1/139,0
7	1300	-1,38/0,11	58,0/4,6	-451,2/137,4
8	1283	-1,38/0,11	58,0/4,7	-450,6/137,1
9	1215	-1,38/0,11	58,0/4,7	-450,6/137,1
10	1148	-1,38/0,11	58,3/4,8	-444,8/135,1
11	1080	-1,39/0,12	58,4/4,9	-441,9/134,0
12	1013	-1,39/0,12	58,5/4,9	-438,9/132,8
13	945	-1,39/0,12	58,6/5,0	-435,9/131,6
14	878	-1,4/0,12	58,8/5,1	-432,8/130,3
15	810	-1,4/0,12	58,9/5,2	-429,7/129,0
16	743	-1,4/0,12	59,0/5,2	-426,7/127,6
17	675	-1,41/0,13	59,2/5,3	-423,5/126,1
18	540	-1,41/0,13	59,5/5,5	-417,0/122,8

Таблиця Г5

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 25 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.25$  м;  $h_3=0.1$  м.

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 23.21$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,35/0,11	57,0/4,7	-439,6/133,2
2	1620	-1,36/0,11	57,2/4,8	-434,4/131,9
3	1552	-1,36/0,11	57,4/4,8	-431,7/131,2
4	1485	-1,37/0,11	57,5/4,8	-429,0/130,5
5	1418	-1,37/0,12	57,6/4,9	-426,2/129,8
6	1350	-1,37/0,12	57,7/4,9	-423,5/129,0
7	1300	-1,37/0,12	57,9/4,9	-421,2/128,4
8	1283	-1,37/0,12	57,9/5,0	-421,06/128,2
9	1215	-1,38/0,12	58,0/5,0	-417,7/127,3
10	1148	-1,38/0,12	58,1/5,0	-414,9/126,5
11	1080	-1,38/0,12	58,3/5,1	-411,8/125,5
12	1013	-1,39/0,12	58,7/5,3	-404,1/122,8
13	945	-1,39/0,12	58,6/5,2	-405,8/123,4
14	878	-1,39/0,12	58,6/5,2	-405,8/123,4
15	810	-1,4/0,13	58,9/5,4	-399,4/121,1
16	743	-1,4/0,13	59,0/5,4	-396,2/119,8
17	675	-1,41/0,13	59,2/5,5	-392,9/118,5
18	540	-1,41/0,14	59,5/5,7	-386,3/115,5

Таблиця Г6

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 27 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.27$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 23.17$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,35/0,12	56,9/5,2	-413,6/125,2
2	1620	-1,36/0,12	57,1/5,2	-408,3/123,0
3	1552	-1,36/0,12	57,2/5,2	-405,7/122,4
4	1485	-1,36/0,12	57,4/5,2	-402,9/121,8
5	1418	-1,37/0,12	57,5/5,3	-400,2/121,2
6	1350	-1,37/0,13	57,6/5,3	-397,4/120,5
7	1300	-1,37/0,13	57,8/5,3	-395,3/120,0
8	1283	-1,37/0,13	57,8/5,3	-394,6/119,8
9	1215	-1,38/0,13	57,9/5,3	-391,6/119,1
10	1148	-1,38/0,13	58,1/5,4	-388,7/118,3
11	1080	-1,38/0,13	58,2/5,4	-385,7/117,5
12	1013	-1,39/0,13	58,4/5,5	-382,6/116,6
13	945	-1,39/0,13	58,5/5,5	-379,5/115,7
14	878	-1,39/0,13	58,7/5,6	-376,3/114,7
15	810	-1,4/0,13	58,9/5,6	-373,1/113,6
16	743	-1,4/0,13	58,9/5,6	-373,1/113,6
17	675	-1,41/0,14	59,2/5,8	-366,5/111,3
18	540	-1,42/0,14	59,6/6,0	-359,5/108,7

Таблиця Г7

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 29 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.29$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma_{cp} = 22.45$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,34/0,13	56,4/5,3	-390,6/122,7
2	1620	-1,35/0,13	56,6/5,3	-385,4/119,3
3	1552	-1,35/0,13	56,8/5,3	-382,7/117,6
4	1485	-1,35/0,13	56,9/5,3	-380,0/115,8
5	1418	-1,36/0,13	57,0/5,3	-377,2/114,1
6	1350	-1,36/0,13	57,2/5,3	-374,4/112,6
7	1300	-1,36/0,13	57,3/5,4	-372,3/112,2
8	1283	-1,36/0,13	57,3/5,4	-371,6/112,0
9	1215	-1,37/0,13	57,5/5,4	-368,6/111,4
10	1148	-1,37/0,13	57,7/5,4	-365,7/110,7
11	1080	-1,37/0,13	57,8/5,4	-362,7/110
12	1013	-1,38/0,13	58,0/5,5	-362,7/109,3
13	945	-1,38/0,13	58,1/5,5	-356,5/108,5
14	878	-1,39/0,13	58,3/5,6	-353,3/107,6
15	810	-1,39/0,13	58,5/5,6	-350,0/107,6
16	743	-1,39/0,13	58,7/5,7	-346,7/105,7
17	675	-1,4/0,14	58,9/5,7	-343,3/104,6
18	540	-1,41/0,14	59,3/5,9	-336,3/102,2

Таблиця Г8

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 33 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.33$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma = 22.44$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площді $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,33/0,15	56,1/6,4	-351,9/118,1
2	1620	-1,34/0,15	56,4/6,4	-346,6/114,3
3	1552	-1,34/0,15	56,5/6,3	-343,9/112,6
4	1485	-1,35/0,15	56,7/6,3	-341,3/111
5	1418	-1,35/0,15	56,8/6,3	-338,6/109,3
6	1350	-1,35/0,15	57,0/6,3	-335,8/107,5
7	1300	-1,36/0,15	57,1/6,3	-333,7/106,2
8	1283	-1,36/0,15	57,2/6,3	-333,0/105,7
9	1215	-1,36/0,15	57,3/6,3	-330,1/103,9
10	1148	-1,37/0,15	57,5/6,3	-327,2/102
11	1080	-1,37/0,15	57,7/6,3	-324,1/100,1
12	1013	-1,37/0,15	57,9/6,3	-321,1/98,1
13	945	-1,38/0,15	58,1/6,3	-317,9/96,0
14	878	-1,38/0,15	58,3/6,4	-314,8/94,8
15	810	-1,39/0,15	58,5/6,4	-311,4/94,1
16	743	-1,39/0,15	58,7/6,4	-308,1/93,3
17	675	-1,4/0,15	58,9/6,5	-304,6/92,5
18	540	-1,41/0,16	58,9/6,6	-297,5/90,6

Таблиця Г9

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 37 см

20°C;  $h_1=0.05$  м;  $h_2=0.37$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma = 22.43$  кН/м<sup>3</sup>;

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,33/0,18	55,9/7,7	-321,4/116,6
2	1620	-1,33/0,18	56,2/7,6	-316,1/112,6
3	1552	-1,34/0,18	56,3/7,6	-313,3/110,4
4	1485	-1,34/0,18	56,5/7,5	-310,6/108,4
5	1418	-1,35/0,18	56,7/7,5	-307,8/106,2
6	1350	-1,35/0,18	56,8/7,4	-304,9/104,1
7	1300	-1,35/0,18	57,0/7,4	-302,8/102,4
8	1283	-1,35/0,18	57,0/7,4	-302,0/101,9
9	1215	-1,36/0,18	57,2/7,4	-299,1/99,6
10	1148	-1,36/0,17	57,4/7,4	-296,1/97,6
11	1080	-1,37/0,17	57,6/7,3	-293,2/95,8
12	1013	-1,37/0,17	57,8/7,3	-290,1/93,9
13	945	-1,38/0,17	58,0/7,3	-287,0/91,9
14	878	-1,38/0,17	58,2/7,3	-283,9/89,9
15	810	-1,39/0,17	58,4/7,3	-280,5/87,8
16	743	-1,39/0,17	58,7/7,3	-277,3/85,7
17	675	-1,4/0,17	58,9/7,3	-273,8/83,4
18	540	-1,41/0,18	59,4/7,4	-266,6/80,5

Таблиця Г10

Результати розрахунку напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Чугуїв-В.Бурлук при товщині шару ресайклінгу 40 см

20°C;

$h_1=0.05$  м;  $h_2=0.40$  м;  $h_3=0.1$  м

$C=41300$  кН/м<sup>2</sup>;  $E_1=3200$  МПа;  $E_3=600$  МПа;  $\gamma = 22.43$  кН/м<sup>3</sup>

№	Модуль ружності, $E_2$ , МПа	Вертикальне переміщення $u^1$ , мм max/min	Реакції ґрунту $R^1$ , кПа max/min	Дотичне напруження на верхній площадці $\tau^{23}$ , кПа max/min
1	1755	-1,32/0,22	55,7/9,1	-296,2/115,1
2	1620	-1,33/0,21	56/9,0	-291,1/111,0
3	1552	-1,33/0,21	56,2/8,9	-288,3/108,9
4	1485	-1,34/0,21	56,4/8,9	-285,6/106,8
5	1418	-1,34/0,21	56,5/8,8	-282,8/104,7
6	1350	-1,35/0,21	56,7/8,7	-280/102,5
7	1300	-1,35/0,21	56,9/8,7	-277,9/100,9
8	1283	-1,35/0,21	56,9/8,7	-277,1/100,3
9	1215	-1,36/0,2	57,1/8,6	-274,2/98,0
10	1148	-1,36/0,2	57,3/8,6	-271,2/95,7
11	1080	-1,37/0,2	57,5/8,5	-268,2/93,4
12	1013	-1,37/0,2	57,7/8,5	-265,1/91,1
13	945	-1,38/0,2	58,0/0,84	-261,8/88,6
14	878	-1,38/0,2	58,2/0,84	-258,6/86,2
15	810	-1,39/0,2	58,5/8,4	-255,3/83,9
16	743	-1,39/0,2	58,7/8,3	-252,0/81,9
17	675	-1,4/0,2	59,0/8,3	-248,6/79,7
18	540	-1,41/0,2	59,5/8,3	-241,4/75,2



ДОДАТОК Г  
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО  
ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ДП «Укрдїпродор»

Гладун С.А.



" 2016 р.

**Довідка  
про впровадження результатів дисертаційної роботи**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю «05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми»  
здобувача Дубика Олександра Миколайовича.

м. Київ

Цією довідкою підтверджується, що результати дисертаційної роботи Дубика Олександра Миколайовича за темою «Моделювання напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу», впроваджені у проектну діяльність підприємства під час проведення аналізу напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу.

У ході виконання робіт під керівництвом Чешуйко В.М., аспірантом Дубиком О.М. були проведені розрахунки напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу, на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+799 – км302+400) з використанням програми «CREDO РАДОН».

Заступник головного інженера-  
начальник інженерно-технічного відділу

В.М. Чешуйко



Затверджую:

Генеральний директор  
ТОВ «КИЇВАВІАПРОЕКТ»*Винник* - Вінник А.Т.

13 » 12 2016 р.

**Акт****про впровадження результатів дисертаційної роботи**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю «05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми»  
здобувача Дубика Олександра Миколайовича.

м. Київ

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Дубика Олександра Миколайовича за темою «Моделювання напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу», впроваджені в проектну документацію ТОВ «КИЇВАВІАПРОЕКТ» при розробленні документації по Міжнародному аеропорту «Бориспіль» - при проведенні аналізу напружено-деформованого стану (НДС) захисних залізобетонних обойм водовідвідних інженерних комунікацій віадуку термінального комплексу «D» МА «Бориспіль».

В ході виконання робіт під керівництвом д.т.н., проф. Цихановського В.К., аспірантом Дубиком О.М. були виконані розрахунки напружено-деформованого стану захисних залізобетонних обойм водовідвідних інженерних комунікацій віадуку термінального комплексу «D» МА «Бориспіль» від колісного впливу тягача НК-80 та власної ваги дорожнього одягу з асфальтобетонними покриттями, НДС яких також досліджувався.

За результатами інженерного та чисельного розрахунку НДС, виконаного в програмному комплексі KARTPK, були розроблені проектні пропозиції по влаштуванню як захисних залізобетонних обойм, так і дорожнього одягу з асфальтобетонними покриттями.

Головний інженер проекту

Г.І. Селіванов

Начальник

архітектурно-будівельного відділу

М.Ф. Поліщук

“ПОГОДЖЕНО”

Проректор з навчальної та  
виховної роботиТ.В. Іванова  
“16” 07 2017 р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з міжнародного  
співробітництваВ.І. Чепіженко  
М.П. « 2017 р.**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Дубика Олександра Миколайовича на тему:

«Моделювання напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу» в навчальний процес Національного авіаційного університету

Члени комісії у складі завідувача кафедрою РААШ ННІАП НАУ, д.т.н., професора Белятинського А.О., к.т.н., професора Ждановича М.П., к.т.н., доцента Пилипенка О.І., к.т.н., доцента Степанчука О.В. склали цей акт про те, що в Національному авіаційному університеті при викладанні дисциплін «Дорожні та аеродромні покриття», «Будівельна механіка (спецкурс)» і виконанні курсових та дипломних робіт студентів за напрямом підготовки 6.060101 «Будівництво» впроваджено результати дисертаційної роботи Дубика О.М., а саме:

- математичну модель, спеціальні алгоритми та програмний комплекс KARTPK для обчислення напружень, переміщень і деформацій в конструкціях дорожніх одягів та аеродромних покриттів;
- чисельний метод розв'язання задачі динаміки накопичення залишкових деформацій в елементах конструкцій нежорстких дорожніх одягів.

Комісія у складі :	Белятинський А.О.	д.т.н., професор реконструкції аеропортів та автошляхів
	Жданович М.П.	к.т.н., професор кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
	Пилипенко О.І.	к.т.н., доцент кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
	Степанчук О.В.	к.т.н., доцент кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
Голова комісії	Белятинський А.О.	д.т.н., професор, завідувач кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
Члени :	Жданович М.П.	к.т.н., професор кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
	Пилипенко О.І.	к.т.н., доцент кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів
	Степанчук О.В.	к.т.н., доцент кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів

яка діє на підставі розпорядження директора Навчально-наукового інституту Аеропортів Національного авіаційного університету від «25» 11 2016 р. № 110.01/330, засвідчує, що результати дисертаційної роботи Дубика Олександра Миколайовича за темою «Моделювання напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу» впроваджені в навчальний процес кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів:

- шляхом використання в курсах лекцій з дисциплін «Дорожні та аеродромні покриття», «Будівельна механіка (спецкурс)» та при виконанні курсових та дипломних робіт.

Голова комісії

Белятинський А.О.

підпис

Члени комісії:

підпис

Жданович М.П.

підпис

Пилипенко О.І.

підпис

Степанчук О.В.