

## **ЛЕКЦІЯ №3**

**з дисципліни ВС.3 “Механіка дорожніх одягів”  
для спеціальності 192 «Будівництво та цивільна  
інженерія»**

**за спеціалізацією “Технології будівельних  
конструкцій, виробів і матеріалів”.**

**Лектор:**

професор, доктор технічних наук

**Мозговий Володимир Васильович**

(завідувач кафедри дорожньо-будівельних  
матеріалів і хімії, д.т.н., професор)

# **Вхідний контроль на лекції №3**

- 1. З яких елементів складається дорожній одяг? Що таке покриття, які функції воно виконує, які вимоги до матеріалів покриття?**
- 2. Що таке основа, які функції воно виконує, які вимоги до матеріалів основи? Що таке додаткова основа, які функції воно виконує, які вимоги до матеріалів додаткової основи?**
- 3. Які види дорожнього одягу за механічними властивостями та їх особливості?**
- 4. З яких етапів складається проектування дорожнього одягу?**
- 5. Мета збору вихідних даних та які основні види інформації для цього використовуються?**
- 6. Мета конструювання дорожнього одягу.**
- 7. Мета розрахунку дорожнього одягу.**
- 8. Мета вибору раціонального варіанту.**

# Тема лекції № 3

**РОЗРАХУНКОВА СХЕМА  
ДОРОЖНЬОГО  
ОДЯГУ ТА ЇЇ РОЗВИТОК**

# План лекції №3

- 1. Емпіричні методи розрахунку дорожніх одягів.**
- 2. Аналітичний метод. Розрахункова схема дорожнього одягу.**

**Методи розрахунку дорожнього одягу поділяються на емпіричні та аналітичні**

## **1 ЕМПІРИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ**

**На ранньому доісторичному етапі проектування і будівництва доріг використовувались емпіричні методи призначення товщин дорожнього одягу на основі досвіду, що виходив із проб і помилок. Наприклад, дорога римської імперії.**

**Сучасні емпіричні методи розрахунку виходять із загальних теоретичних уявлень та базуються на закономірностях, встановлених в результаті натурних експериментів і обстежень.**

**Найбільш масштабний і дорогий експеримент по випробуванню дорожнього одягу був проведений у 1958-62 р., у США. Американською асоціацією державних дорожніх спеціалістів (AASHO).**

**Мета випробування: чисто експериментально, без яких-небудь теоретичних передумов встановити зв'язок між навантаженням на вісь G, заданим числом проїздом до руйнування  $N\Sigma$  та необхідною товщиною дорожнього одягу H.**

**Методика випробувань полягала у наступному.**

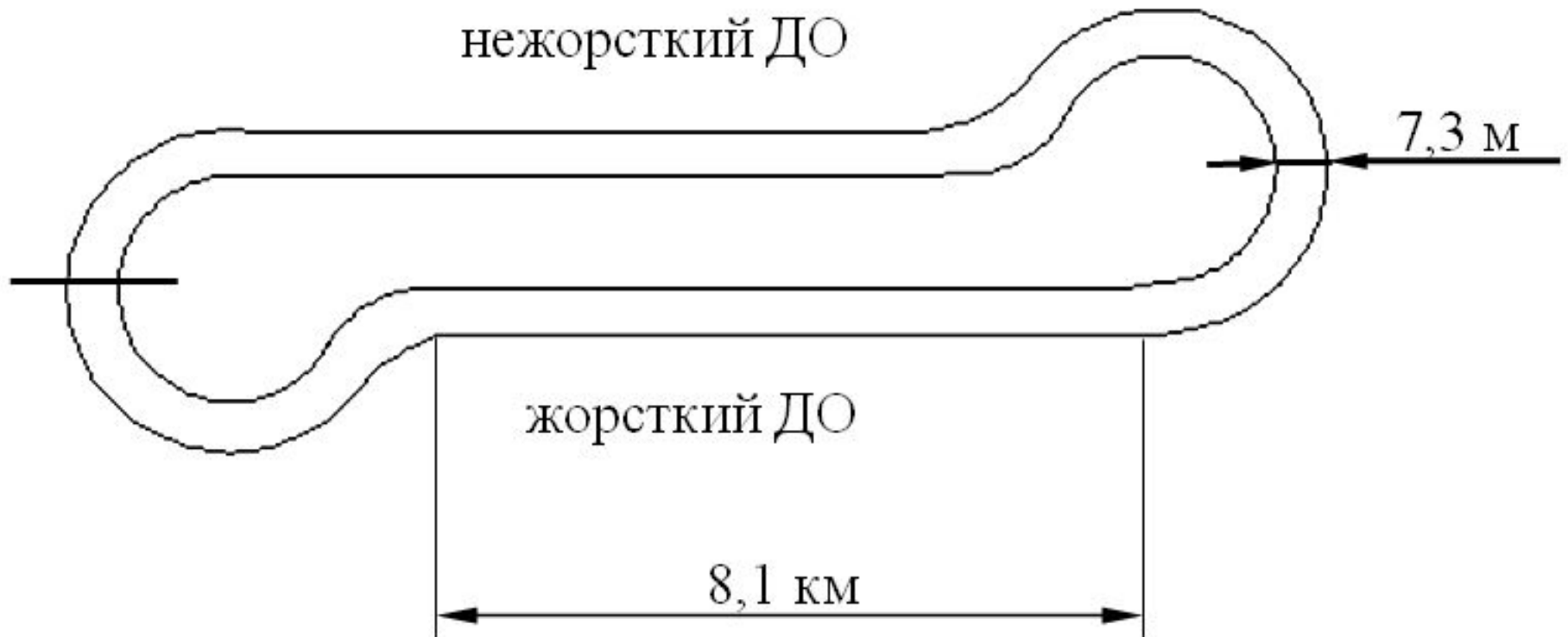
**Об'єми дослідження: 240 конструкцій нежорсткого дорожнього одягу та 272 жорсткого дорожнього одягу, усього 512 типів конструкцій.**

**Навантаження від 9 до 136 кН на одиночну вісь і від 109 до 218 кН на здвоєні осі.**

**Щоб дорожні одяги приблизно відповідали навантаженням зразки матеріалів і ґрунту попередньо відправляли в декілька штатів для випробування та розрахунку товщини.**

**Експерименти проводили неподалік від Чикаго (80 км) на 6 експериментальних полігонах доріг у вигляді «петель».**

**Рух було організовано так, що по одній смугі кожної петлі проїжджали автомобілі з визначеним осьовим навантаженням.**

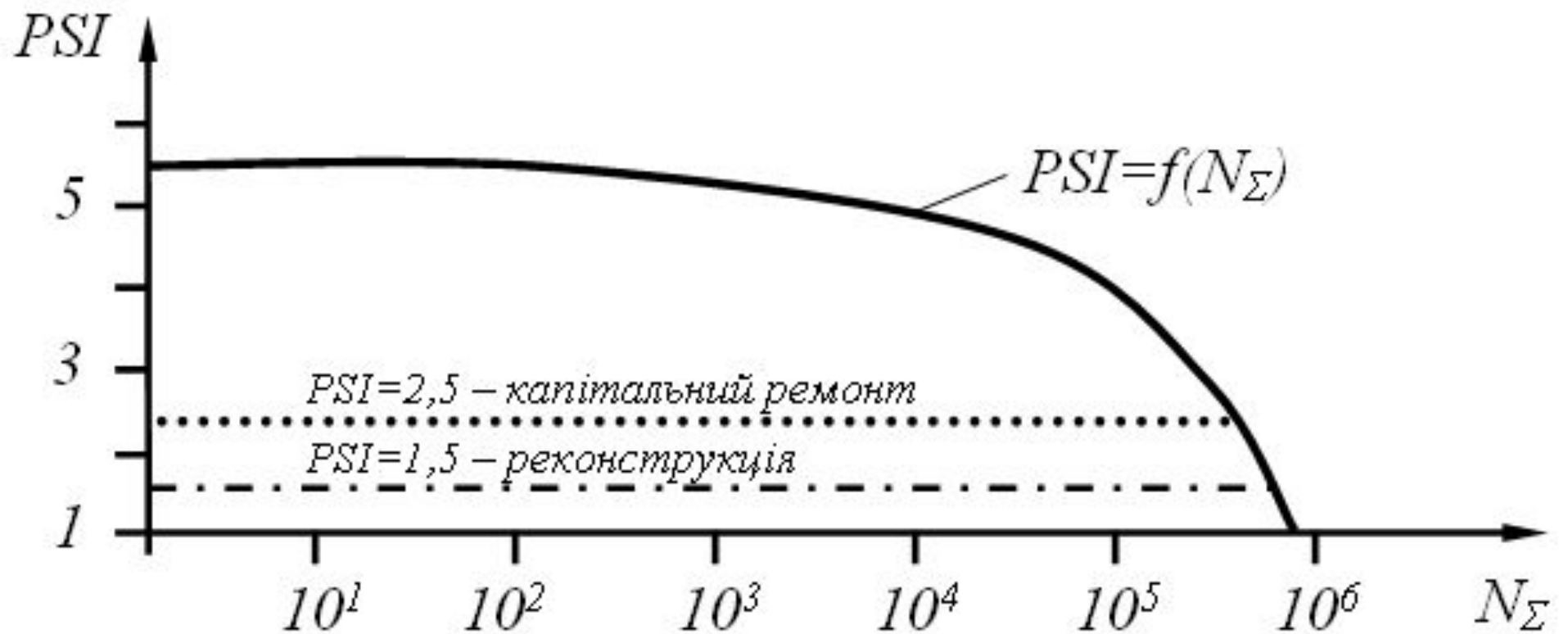




Не рідше ніж 1 раз у 2 тижні оцінювали стан кожної секції після збільшення сумарного числа проїздів. Випробування рухом проводили до стану, що відповідає  $N\Sigma=1,5$  або до  $N\Sigma=106$ .

У ході дослідів загальний стан кожної секції оцінювали по п'ятибальній шкалі, користуючись показанням PSI: 4 і 5 - дуже добре; 3-4 - добре; 2 і 3 - посередньо; 1-2 - погано.

Результати випробувань дозволили побудувати моделі



**Після обробки результатів отримали емпіричну залежність показника PSI від характеристик стану покриття:**

$$PSI = 5 - 1,9 \lg(1 + \Delta i_{cp}) - 0,01 \sqrt{C + P} - 0,002 d^2$$

**де:  $\Delta i_{cp}$  - середня зміна поздовжнього ухилу;**

**$C+P$  - площа із тріщинами і ямковим ремонтом,  $m^2/1000m^2$ ;**

**$d$  - середня глибина колії, мм.**

**Результати випробувань також дозволили встановити:**

**довговічність дорожнього одягу при даному навантаженні  $Q$  залежить не від приведеної товщини  $H_{заг}$ , а від приведеної:**

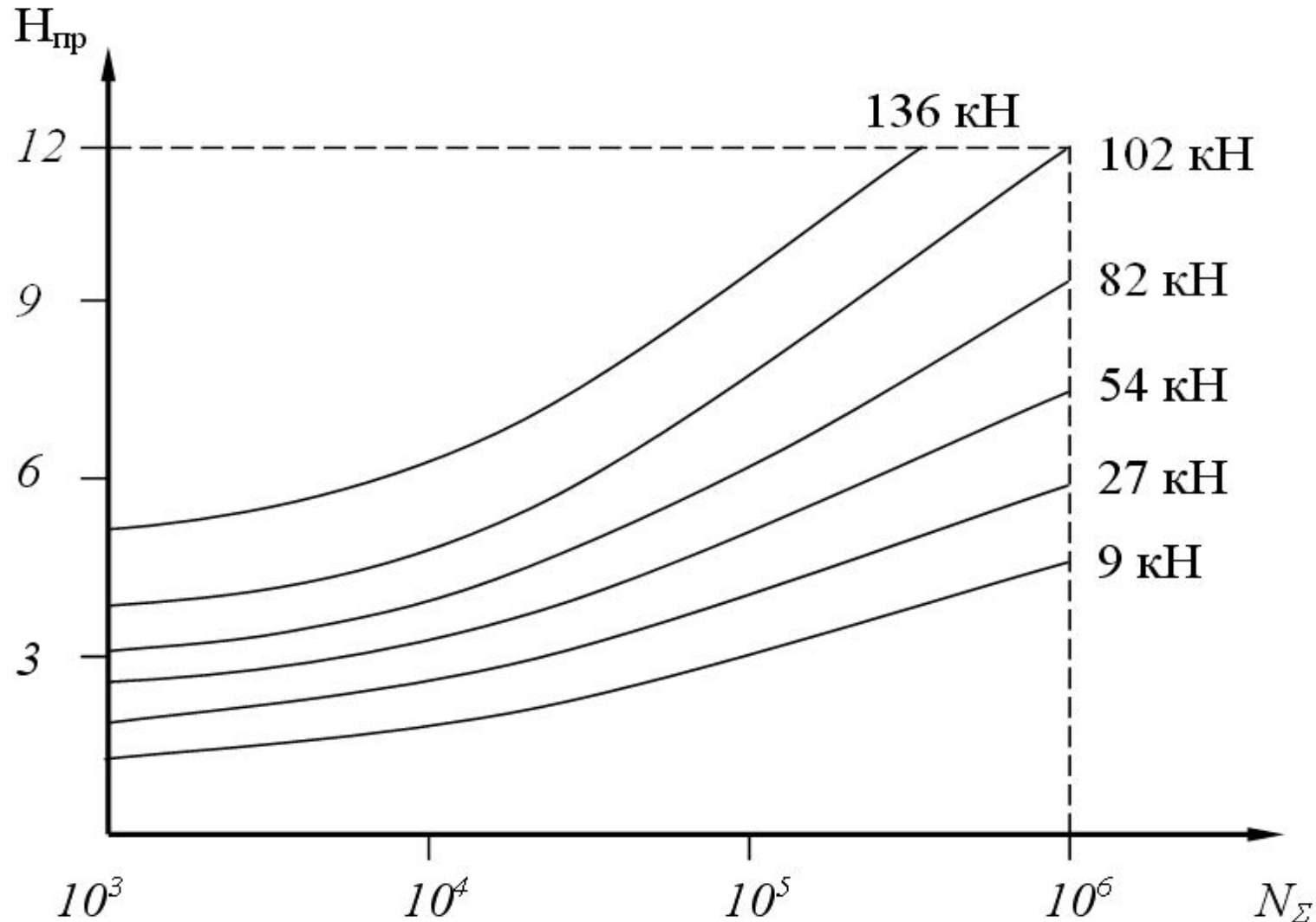
$$H_{пр} = a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3, \quad (1)$$

**де  $a_i$  - безрозмірний коефіцієнт, що залежить від матеріалу шару: для а/б - 0,44; для щебеню - 0,14; для гравійно-піщаної суміші - 0,11, тобто:**

$$H_{пр} = 0,44 \cdot h_1 + 0,14 \cdot h_2 + 0,11 \cdot h_3, \quad (2)$$

**де  $h_i$  – товщина шару в см.**

На основі експериментів були розроблені номограми для розрахунку нежорстких і жорстких дорожніх одягів. Наприклад, для розрахунку нежорсткого дорожнього одягу вона має вигляд:



Для розрахунку товщини, наприклад, основи зі щебеню -  $h_2$ , задаються конструктивно товщинами покриття  $h_1 = 8$  см та додаткової основи  $h_3 = 30$  см для  $Q = 102$  кН. За номограмою -  $H_{\text{пр}} = 12$  см, тоді на основі (2):

$$12 = 0,44 \cdot 10 + 0,14 \cdot h_2 + 0,11 \cdot 45 \rightarrow h_2 = 19 \text{ см.}$$

**Однак, емпіричні методи мають і недоліки:**

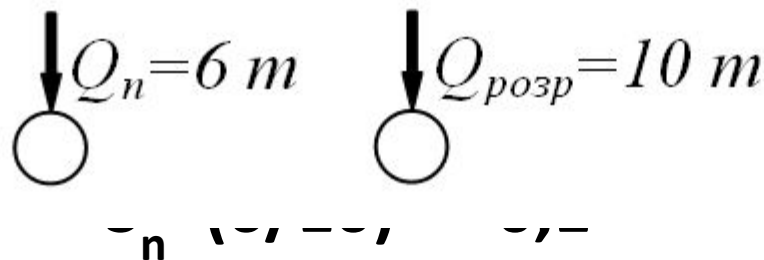
- результати отримуються лише стосовно природніх умови і ґрунту випробовувального полігону;**
- неможливий прогноз для інших навантажень і умов (інші колісні схеми, глибина промерзання, опади та ін.);**
- невідомо, як веде себе конструкція після підсилення.**

Водночас результати AASHO дозволили встановити загальнонаукові закономірності поведінки дорожніх одягів від дії повторних навантажень та вирішувати ряд задач в сучасній практиці:

- для визначення коефіцієнтів приведення до розрахункового навантаження:  $S_n$ -коефіцієнт приведення навантаження  $Q_n$  від колеса до розрахункового навантаження  $Q_{розр}$ :

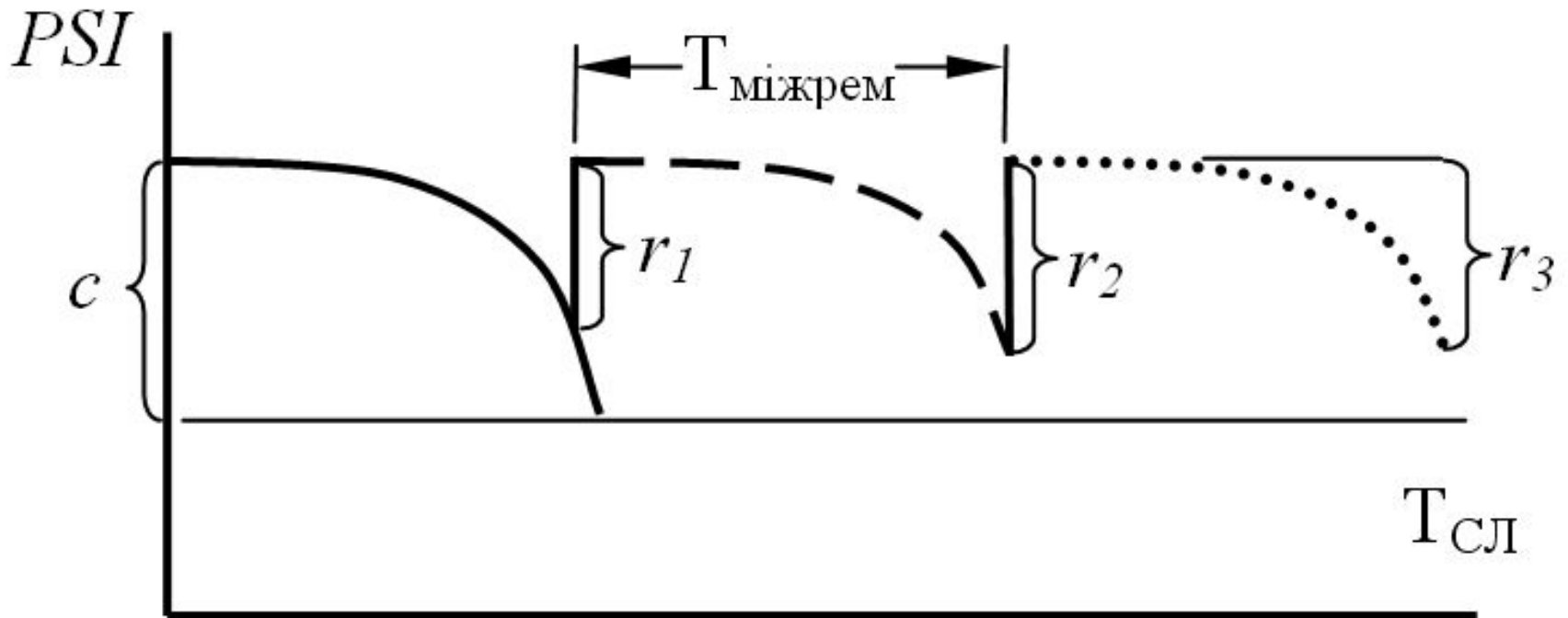
$$S_n = (Q_n / Q_{розр})^{4,4} \quad (3)$$

Наприклад,



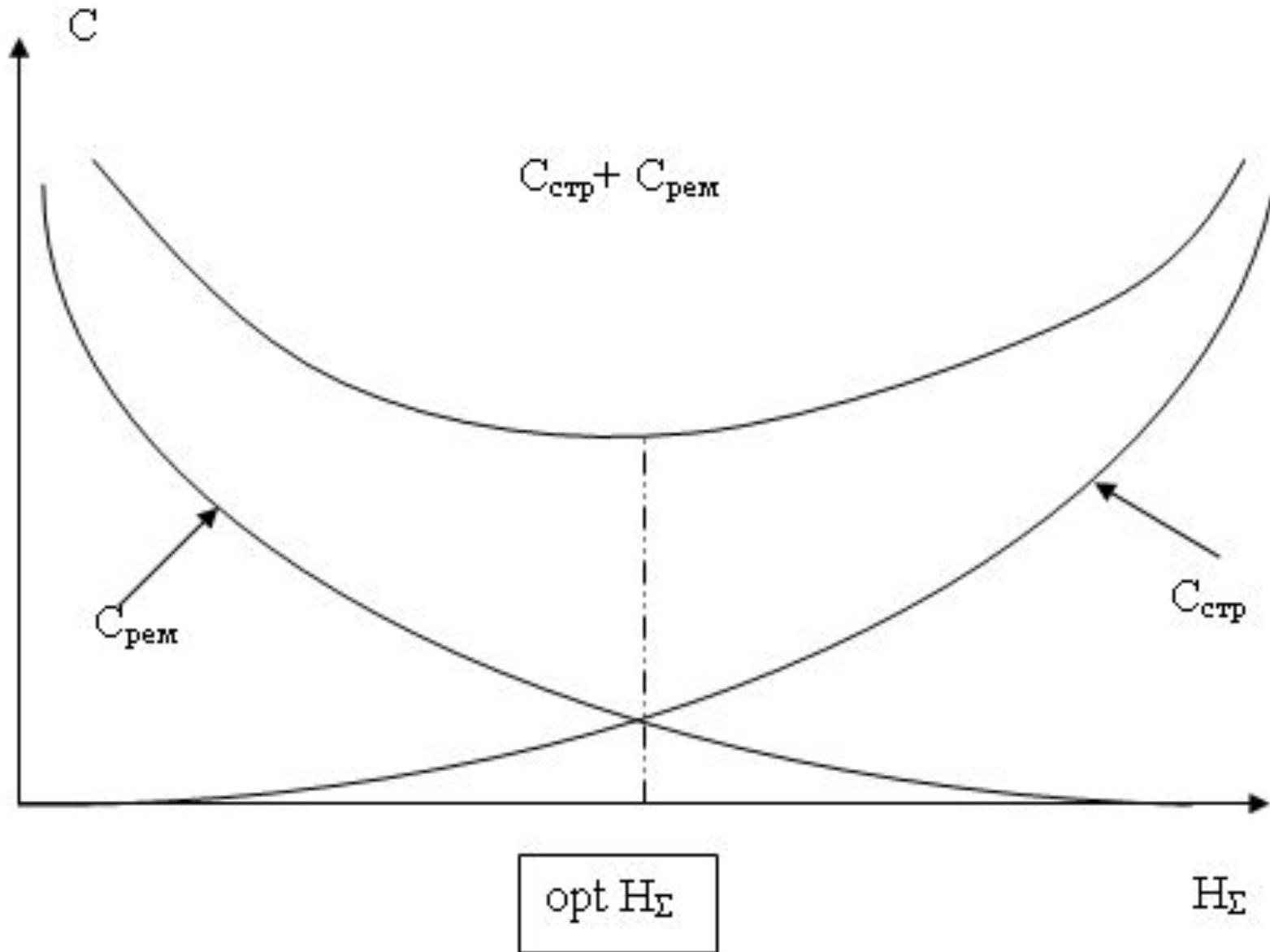
- для розробки системи управління станом дорожнього одягу.

## Побудова моделі деградації





# Оптимізація витрат

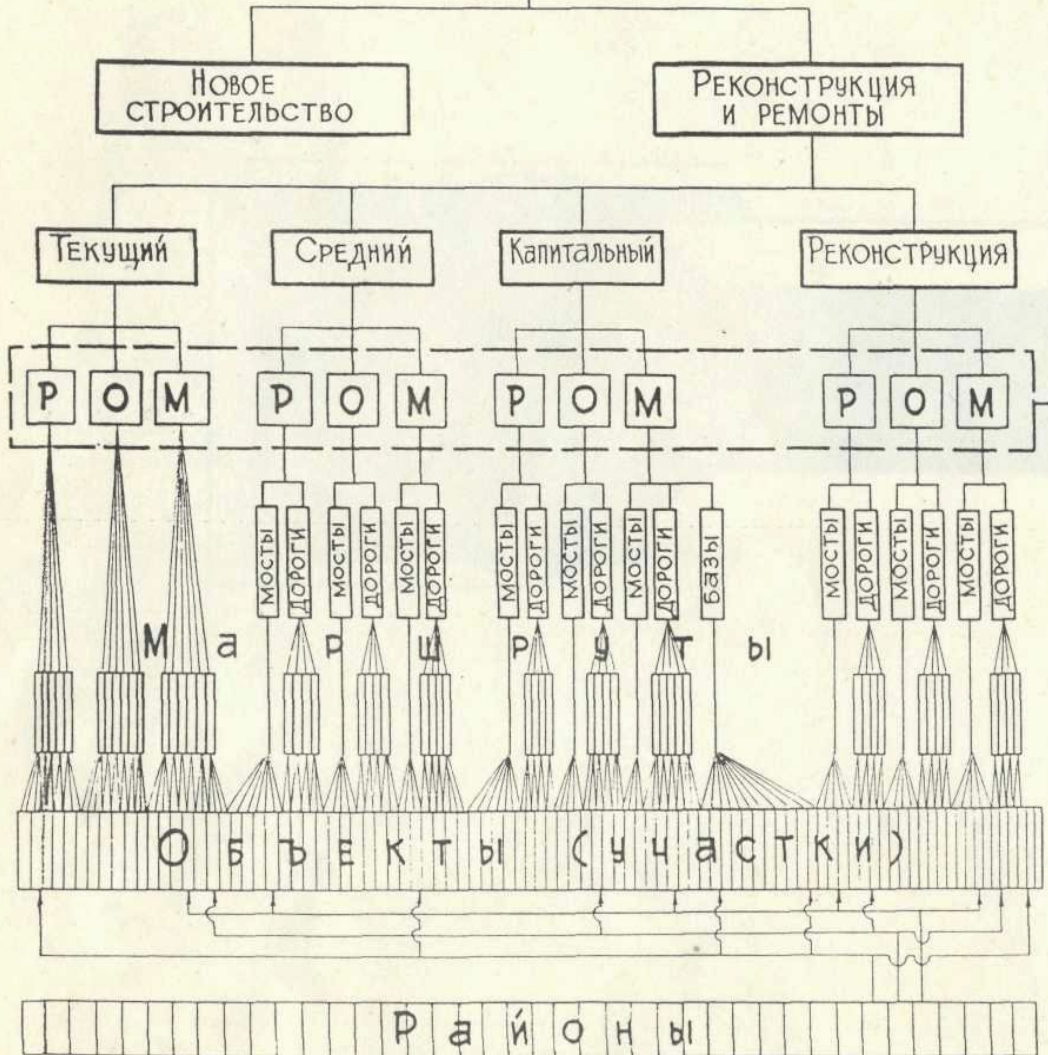


На даний час «Укравтодор» ставить перед собою завдання виконати аналіз досвіду роботи Системи управління станом дорожніх покриттів (СУСП) та здійснити його удосконалення. Для цього передбачається провести наукові дослідження та удосконалити модель прогнозування вичерпування довговічності нежорсткого дорожнього одягу на основі критеріїв рівності та руйнувань з урахуванням напружено-деформованого і граничного станів матеріалів основ та покриттів. Розроблена модель повинна мати: критерій ефективного розподілу фінансових ресурсів на ремонтні роботи, періоди прогнозування та терміни коригування, алгоритм моделювання, фізична та математична моделі роботи конструкцій підсилення нежорсткого дорожнього одягу у процесі експлуатації. На основі удосконалених та розроблених моделей і алгоритмів удосконалити СУСП шляхом розроблення інформаційно-аналітичної системи для моделювання, планування та розподілу фінансових ресурсів на ремонтні роботи автомобільних доріг загального користування з урахуванням прогнозу деградації нежорстких дорожніх одягів. Розроблена інформаційно-аналітична система повинна бути web-доступною, мати відповідну експлуатаційну документацію (інструкцію користувача), має відповідати вимогам чинних стандартів з інформаційного забезпечення дорожнього господарства та бути адаптованою до інтеграції в Єдину базу даних (ЄБД). Передбачається

**Раціональне використання  
матеріалів і коштів при будівництві  
і ремонті автомобільних доріг**

# СХЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ

Источники финансирования	Указ
	2%
	ГСМ
	Бюджет
$\Sigma$ СРЕДСТВ	



## ВОЗНИКАЮЩИЕ ВОПРОСЫ

1. Чем руководствоваться, распределяя средства между новым строительством и ремонтами, видами ремонтов, группами дорог по их значению, районами области?
2. Как выбрать участки дорог для проведения их ремонта где вложение средств будет максимально эффективным, каким критерием руководствоваться?
3. Как спрогнозировать изменение состояния сети дорог на определенный период, установить зависимость между размером средств и изменением состояния, обосновать минимально необходимый размер средств для поддержания сети без ухудшения состояния?
4. Как оценить степень убытка от административных /волевых/ решений?
5. Как выработать и оценить стратегию ремонтов дорожной сети исходя из размера выделенных средств?

## НЕОБХОДИМО УЧЕСТЬ ЧТО:

1. Участки отличаются один от другого конструкцией дорожной одежды, грунтово-геологическими условиями, нагрузками, возрастом, историей ремонтов, разбросом прочности.
2. Состояние каждого участка изменяется во времени.
3. Изменение состояния одного и того-же участка до и после проведения ремонта происходит по различным зависимостям.
4. При проведении ремонтных работ в разные моменты времени необходимо применять коэффициент разновременности затрат.

## ЧТО ДЕЛАТЬ?

Создать систему, включающую в себя:

1. Базу данных о состоянии дорожных одежд, которая непрерывно обновляется путем обследования с применением различных установок с использованием экспериментальных оценок показателей состояния дорог в данный момент времени.
2. Математическую модель прогнозирования изменения оценки эксплуатационного состояния дорожной одежды во времени.
3. Критерии оптимизации для выбора стратегии проведения ремонтных мероприятий.
4. Математическую модель определения наилучшей комбинации очередности работ на разных участках и выбора вида и последовательности ремонтных работ на каждом из них.



# КРИВАЯ ДЕГРАДАЦИИ И ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

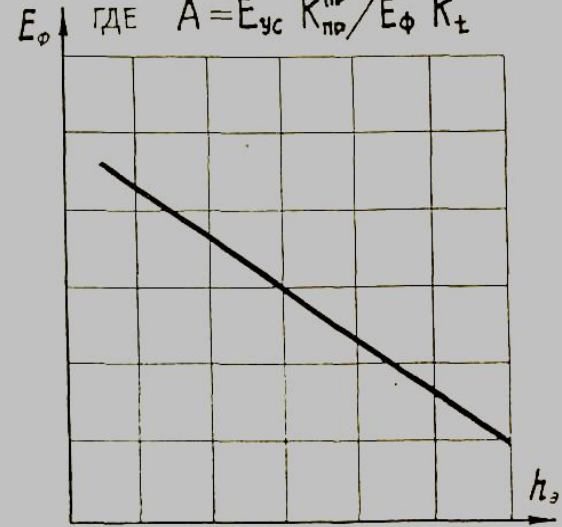
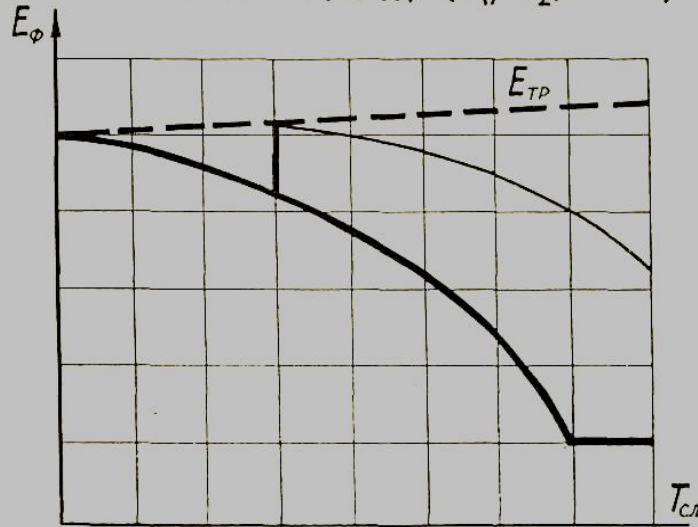
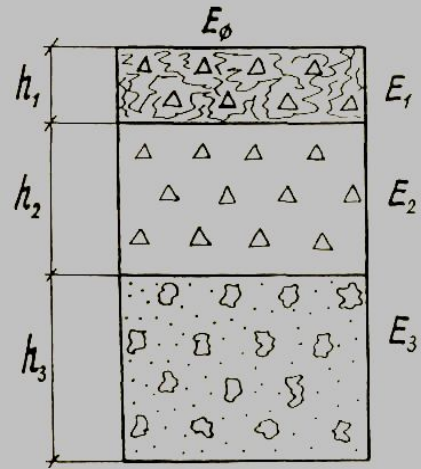
Общий модуль упругости

$$E_{\phi} = E_1 \left( \frac{E_1/E_2 - 1}{\sqrt{1 + 4(h/D)^2 (E_1/E_2)^{2/3}} + 1} \right)$$

Толщина слоя усиления

$$h = \left[ \frac{(A-1) / (E_{ус} / E_{ТР} - 1) - 1}{\sqrt[3]{A}} \right]^2$$

ГДЕ  $A = E_{ус} K_{пр}^{пр} / E_{\phi} K_{\pm}$



$$t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < \dots$$

$$E_1 > E_1' > E_1'' > E_1''' > E_1^{IV} > \dots$$

$$E_2 > E_2' > E_2'' > E_2''' > E_2^{IV} > \dots$$

$$E_3 > E_3' > E_3'' > E_3''' > E_3^{IV} > \dots$$

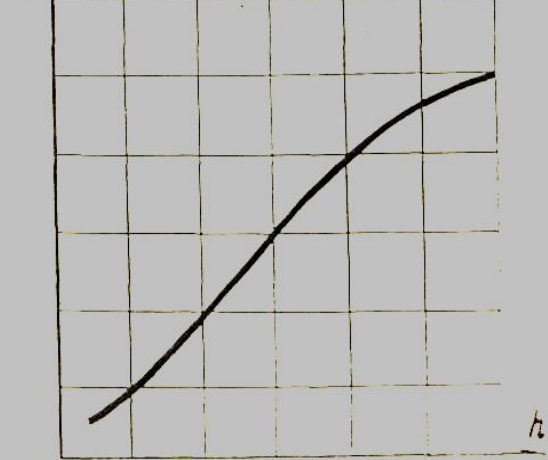
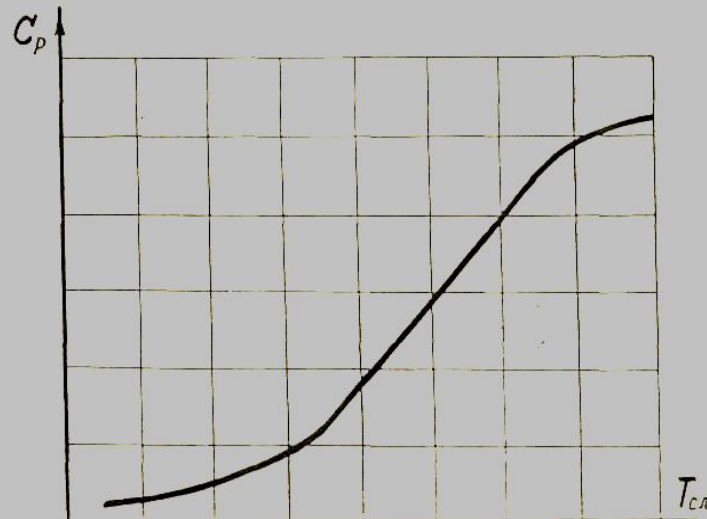
$$E_0 = E_0' = E_0'' = E_0''' = E_0^{IV} = \dots$$

$$E_{\phi} > E_{\phi}' > E_{\phi}'' > E_{\phi}''' > E_{\phi}^{IV} > \dots$$

Стоимость ремонта, руб/м<sup>2</sup>

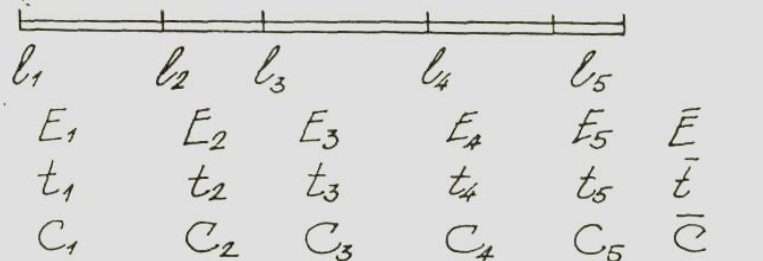
$$C_p = 0.58 h_3 \quad \text{для I-III катег.}$$

$$C_p = 0.4 + 0.25 h_3 \quad \text{для IV-V катег.}$$

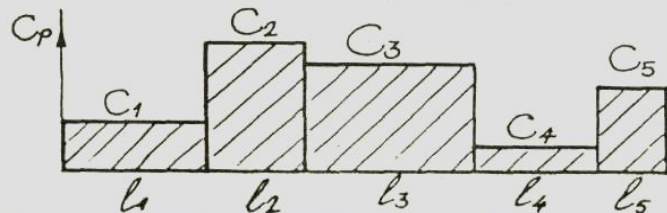


# КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

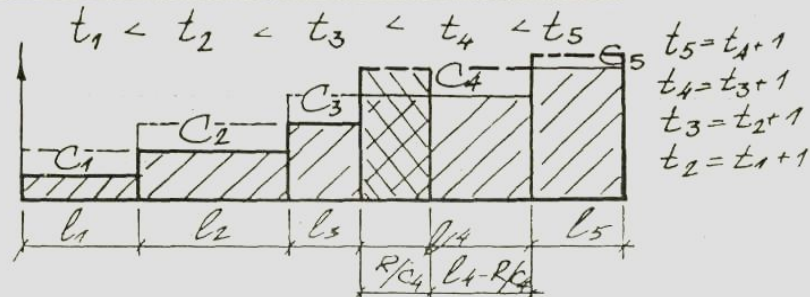
Полный необходимый ремонт



$$\text{ПНР}_1 = C_1 l_1 + C_2 l_2 + C_3 l_3 + C_4 l_4 + C_5 l_5 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot l_i$$



НОВЫЕ УЧАСТКИ	2	5	4	1	3
---------------	---	---	---	---	---

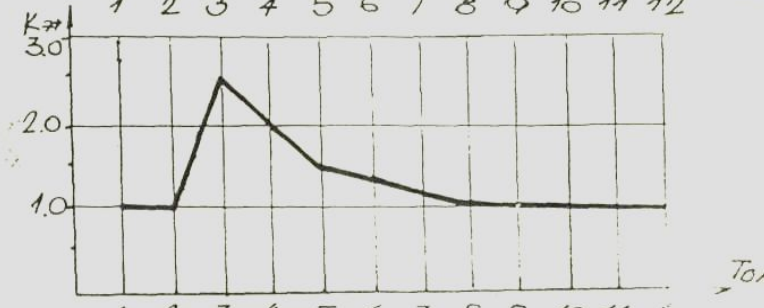
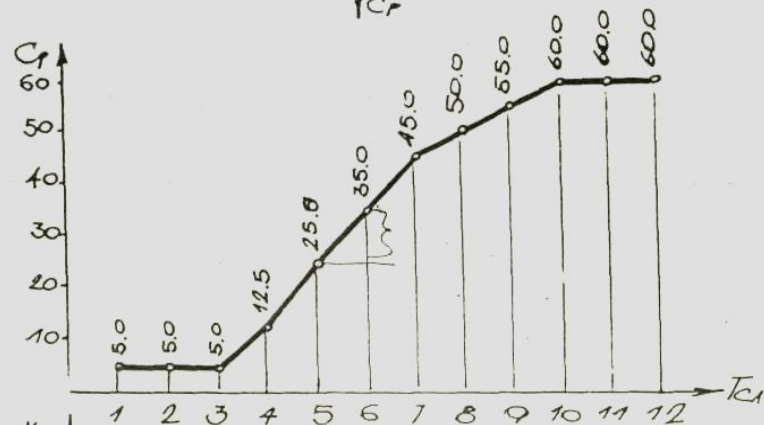
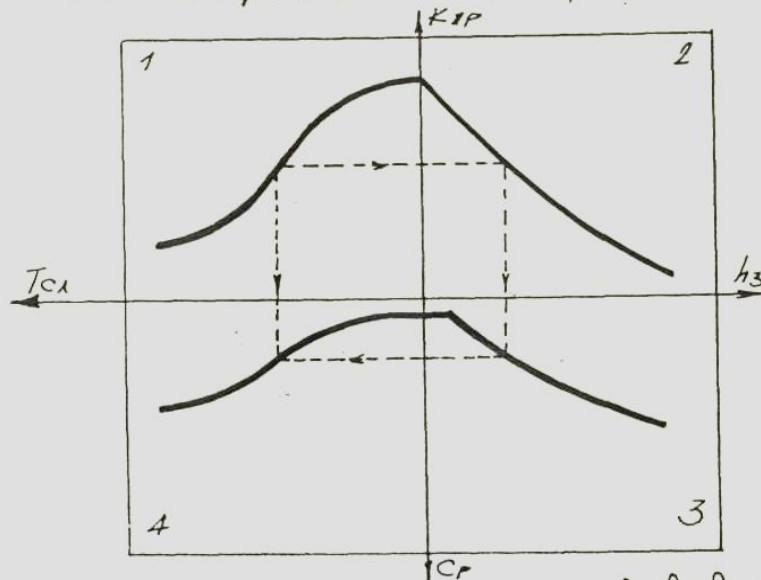


$$\begin{aligned} \text{ПНР}_1 &= C_1 l_1 + C_2 l_2 + C_3 l_3 + C_4 l_4 + C_5 l_5; \\ \text{ПНР}_2 &= C_2 l_1 + C_3 l_2 + C_4 l_3 + C_5 l_4 + (C_5 + \Delta C) l_5; \\ \text{ПНР}_2' &= C_2 l_1 + C_3 l_2 + C_4 l_3 + C_5 (l_4 - \frac{R}{C_4}) + (C_5 + \Delta C) l_5; \\ \text{ПНР}_2'' &= C_2 l_1 + C_3 l_2 + C_4 l_3 + C_5 l_4 + (C_5 + \Delta C) l_5 - C_5 \frac{R}{C_4}; \end{aligned}$$

$$\boxed{\text{ПНР}_2' = \text{ПНР}_2 - R \cdot \frac{C_5}{C_4}} \quad \boxed{K_{эф} = \frac{C_5}{C_4} = \frac{C_{i+1}}{C_i}}$$

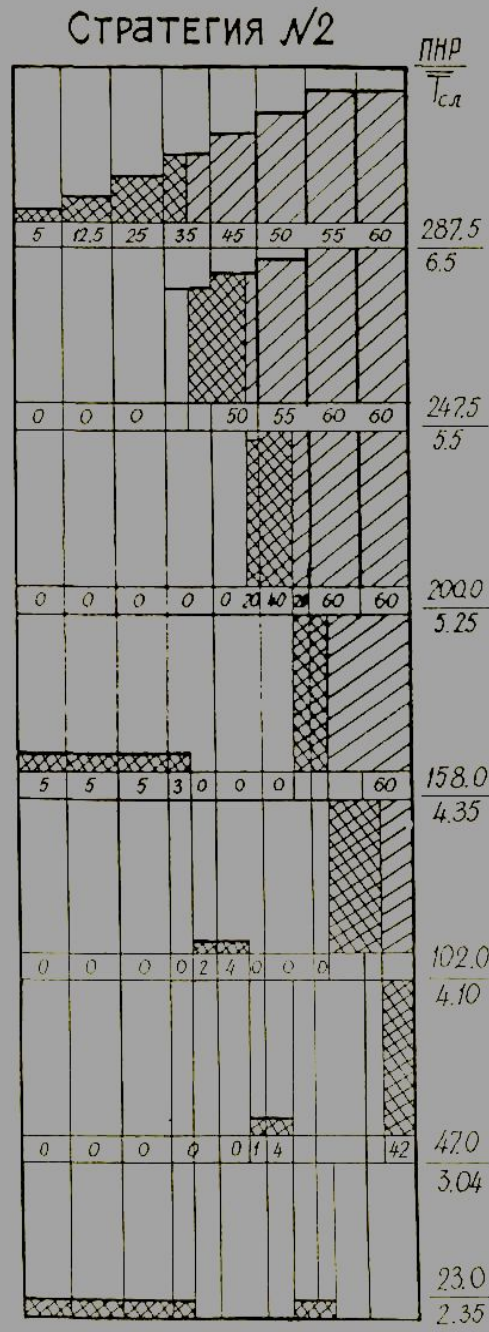
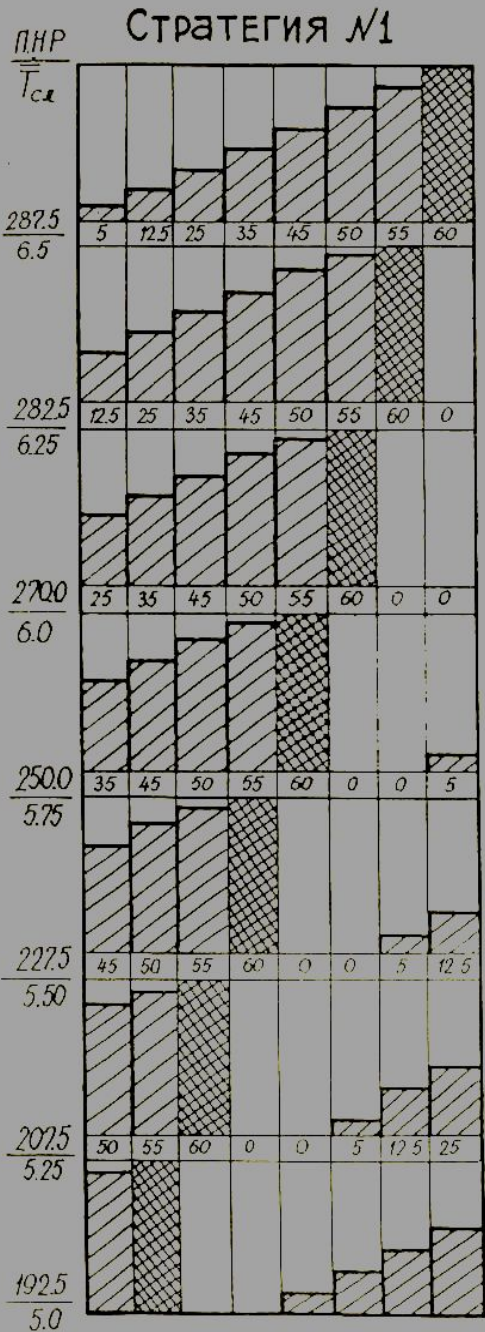
$$\boxed{\text{ПНР}_2'' = \text{ПНР}_2 - R \cdot K_{эф}}$$

Коэффициент эффективности



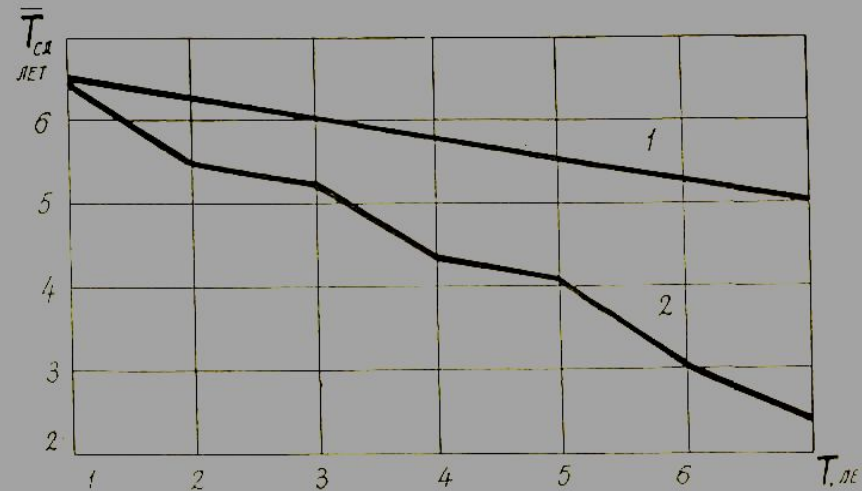
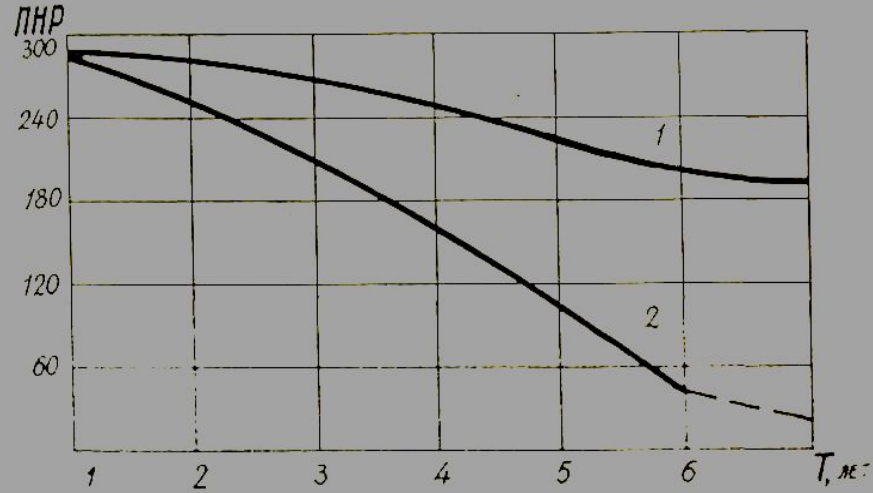


# ВЫБОР СТРАТЕГИИ РЕМОНТА ОДНОЙ ДОРОГИ



$$ПНР'_2 = ПНР_2 - (z_1 K_1 + z_2 K_2 + z_3 K_3 + \dots + z_i K_i + \dots + z_n K_n);$$

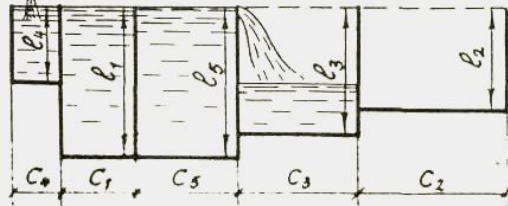
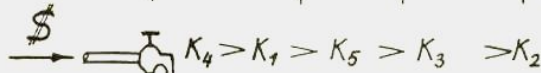
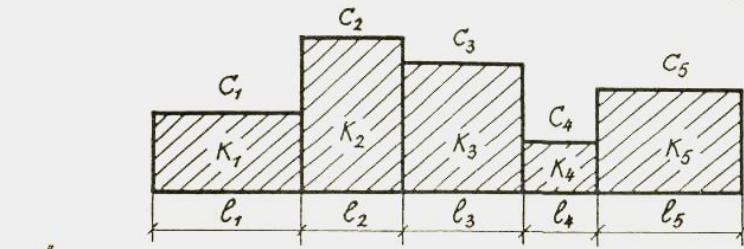
$$ПНР'_2 = ПНР_2 - \sum_{i=1}^n z_i K_i; \quad T_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta}$$



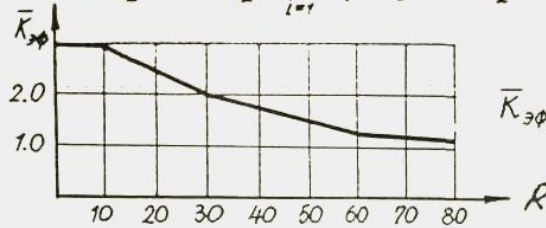
23.0  
2.35

# СПОСОБ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ МЕЖДУ РАЗНЫМИ ДОРОГАМИ

1. Усредненный коэф. использования средств для 1 дороги

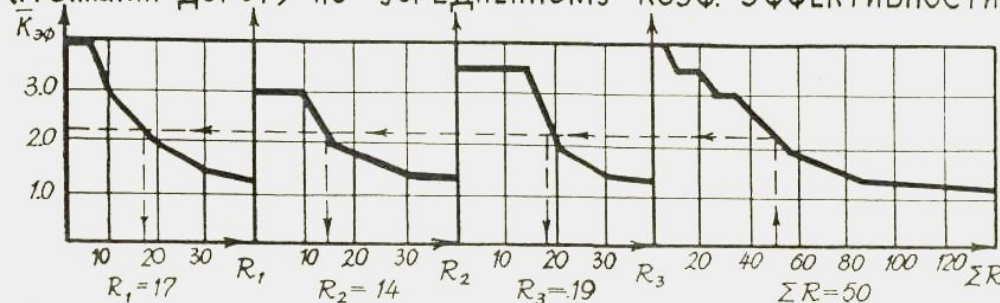


$$ПНР'_2 - ПНР_2 - \sum_{i=1}^n z_i \cdot K_i = ПНР_2 - R \cdot K_{эф}$$



$$\bar{K}_{эф} = \frac{ПНР_2 - ПНР'_2}{R}$$

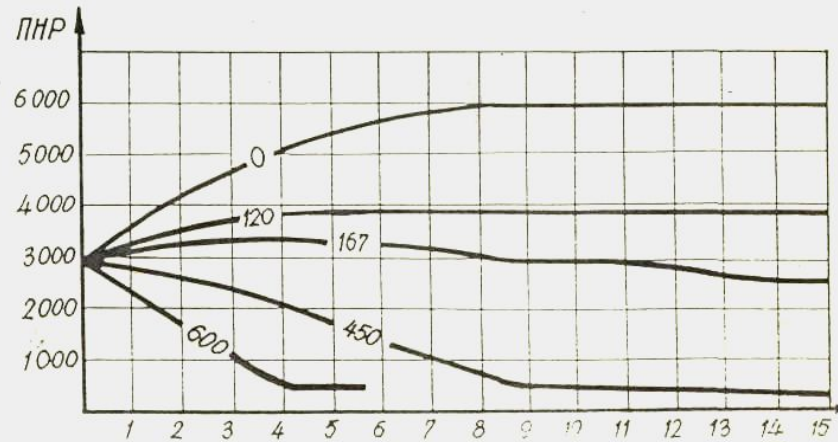
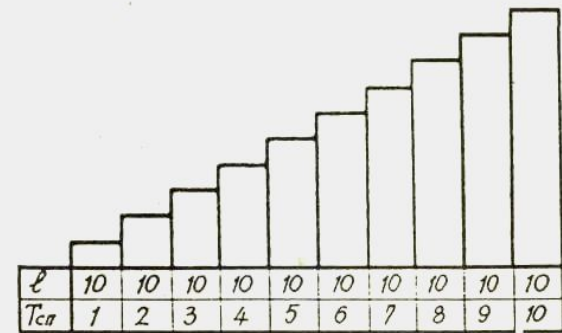
2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДСТВ МЕЖДУ РАЗНЫМИ ДОРОГАМИ (ГРУППАМИ ДОРОГ) ПО УСРЕДНЕННОМУ КОЭФ. ЭФФЕКТИВНОСТИ



# СПОСОБ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ МЕЖДУ РАЙОНАМИ

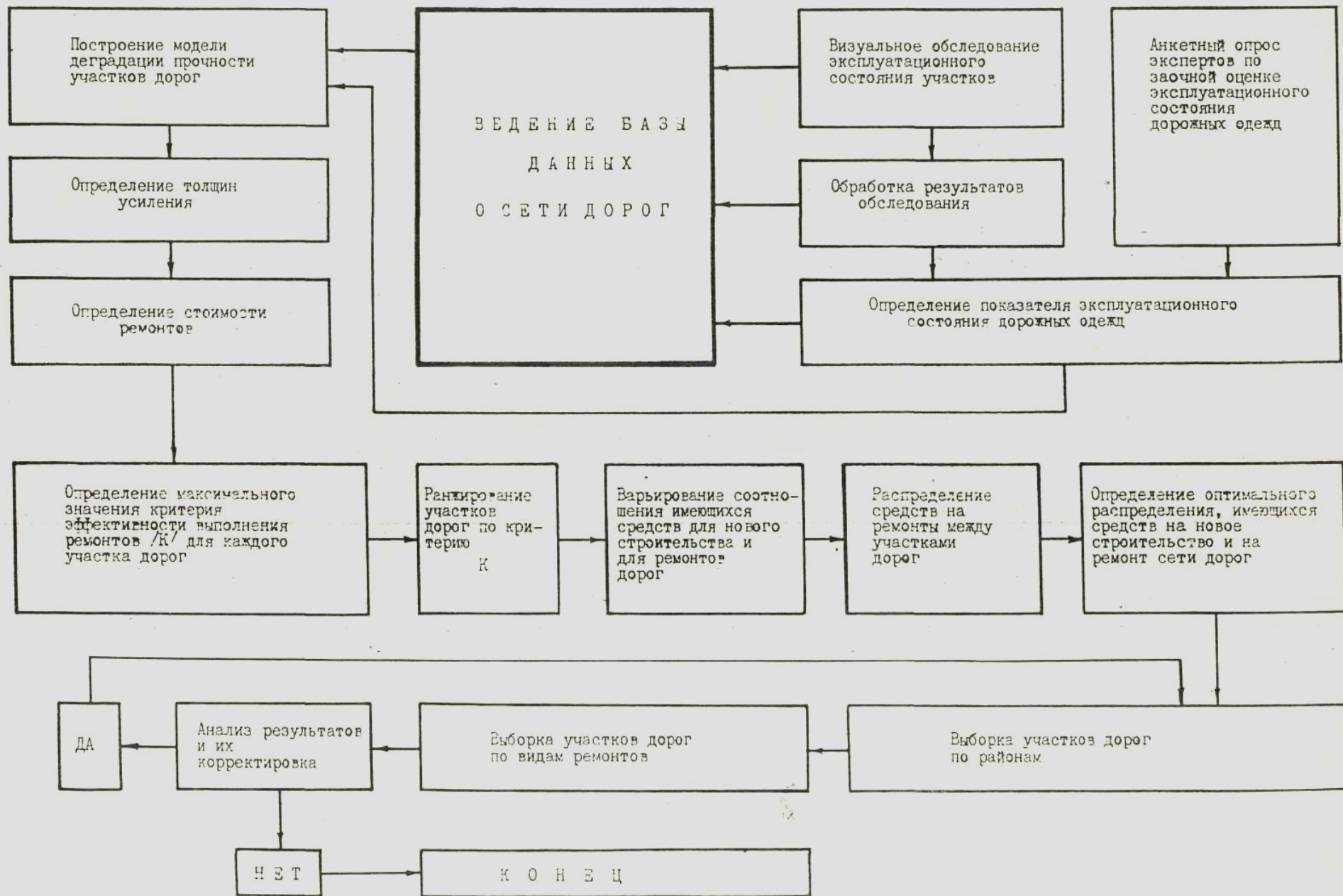
Районы	РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДСТВ					Убыток от прин. решения
	по ПНР	по Kэф	по Lc	по сбору средств	Принято	

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СЕТИ ДОРОГ РАЙОНА (ОБЛАСТИ)





# БЛОК-СХЕМА ПРОГРАММЫ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ







# БАЗА ДАННЫХ

# СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ

## Районы

Шифр	01
Наименование	Бахмачский

## Маршруты

Шифр	00021
Наименование	Чернигов - Н. СЕВЕРСКИЙ
Значение	Р
Адрес	108 856

## Дороги

Шифр	0002101
Адрес	210 564

## Паспортные данные по участкам

Адрес	312	325
Дата ввода	01.05.74	
Категория	I	
Интенсивность движения	400	
Тип грунта	Супесь пылеватая	
Ширина покрытия	7.0	
Ширина зем. полотна	12.0	
Конструкция	XXX	

## Состояния

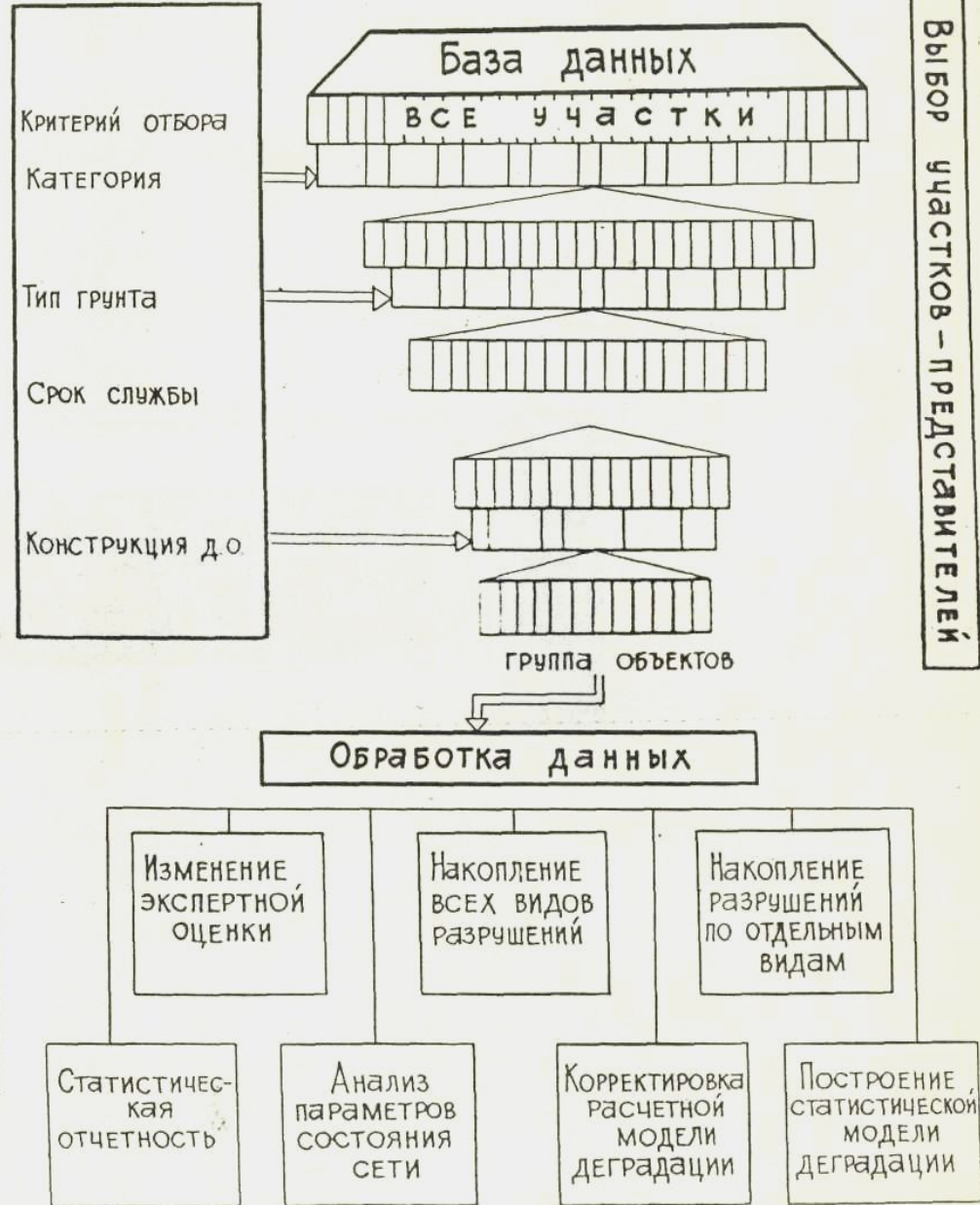
Дата обследования	01.09.94
-------------------	----------

Адрес	250	275
Шелушение		
Ямочность		
Просадки		
Сетка трещин		
Трещины продольные		
Трещины поперечные		
Волны и сдвиги		
Колейность		
Кромки		
Ямы на обочине		
Проведенные ремонты		
Экспертная оценка		

## Ремонты

Дата выполнения	08.06.92
-----------------	----------

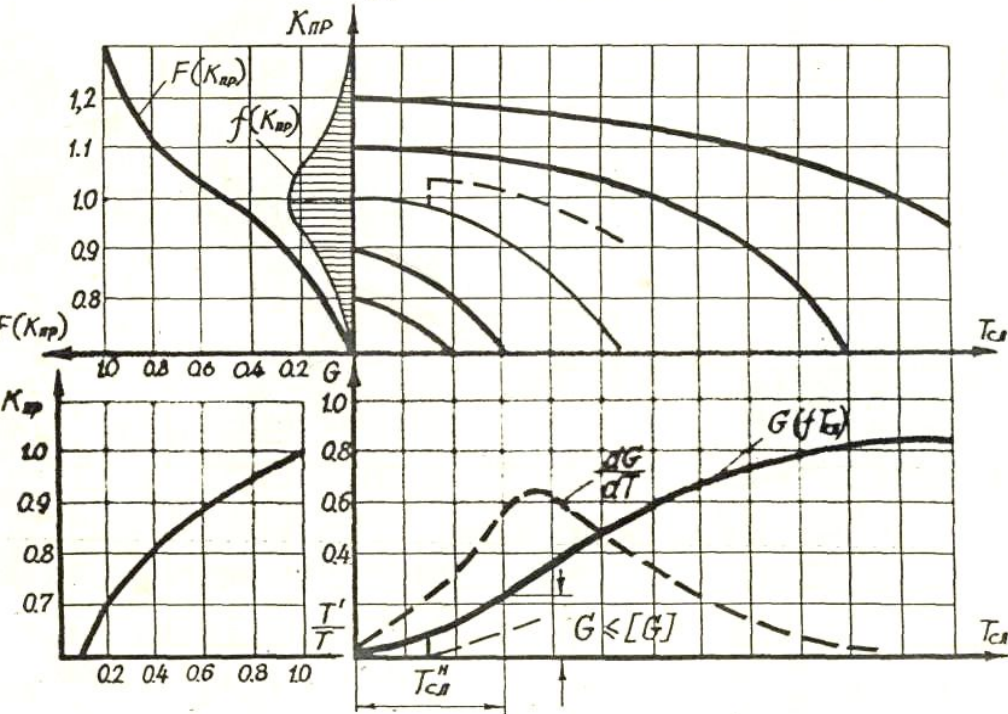
Адрес	280	342
Вид ремонта	СРЕДНИЙ	
Ширина покрытия	7.0	
Ширина зем. полотна	12.0	
Конструкция усиления	XXX	



# ВОПРОСЫ, ТРЕБУЮЩИЕ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ПРОРАБОТКИ

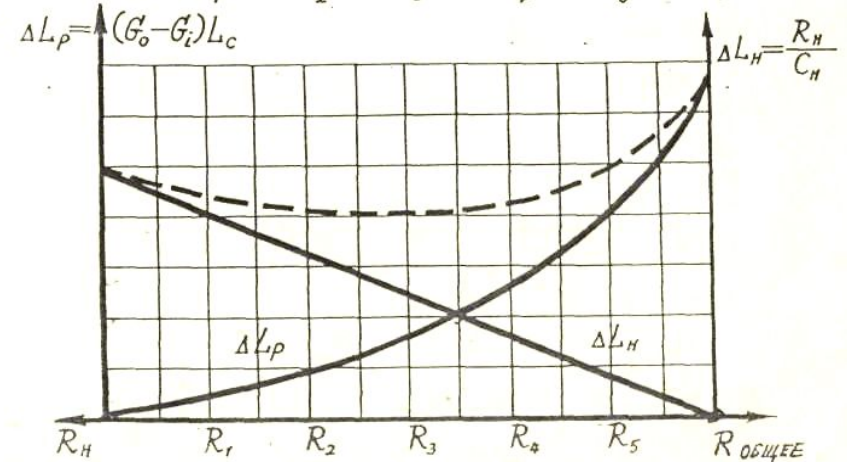
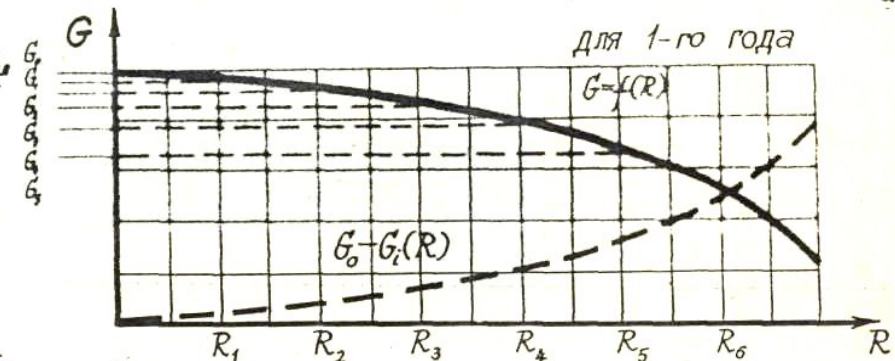
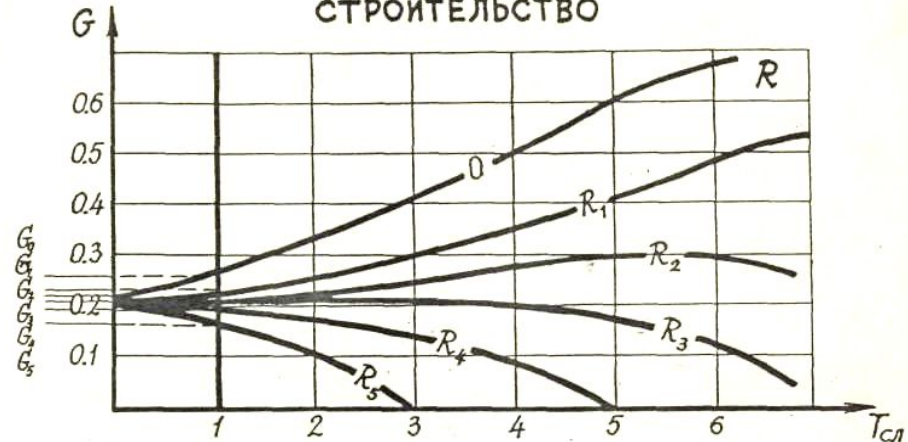
## 2. ОТВЛЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ НА НОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

1. Назначение требуемого модуля упругости дорожной одежды с учетом объема разрушений  $G$  и уточнение стратегии ремонтов одного участка



Функция цели

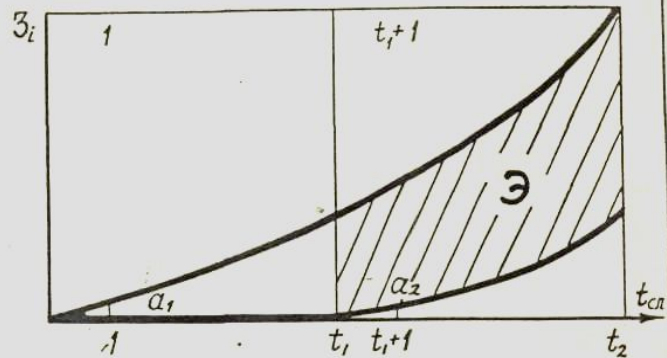
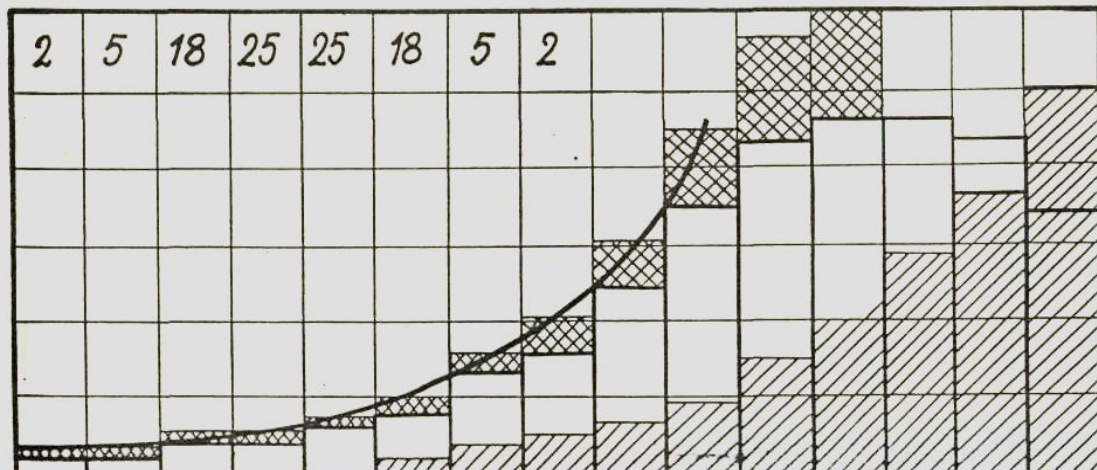
$$\sum_{i=1}^n \eta_i C_i + \sum_{i=1}^n h_i F \cdot \alpha \cdot G_i \eta_i \rightarrow \min$$





# ВОПРОСЫ, ТРЕБУЮЩИЕ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ПРОРАБОТКИ

## 3. УЧЕТ ЗАТРАТ ПО ТЕКУЩЕМУ РЕМОНТУ

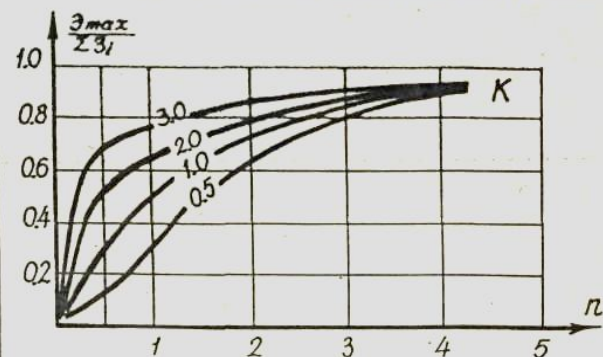


$$z_i = a \times t^n$$

$a$  — затраты 1<sup>го</sup> года

$t$  — ВРЕМЯ СЛУЖБЫ

$z_i$  — затраты по текущему ремонту



$E_{max}$  — максимально возможная экономия затрат по текущему ремонту в результате проведения среднего ремонта

$$\frac{E_{max}}{\sum z_i} = 1 - \frac{1}{(\sqrt[n]{K} + 1)^n}$$

$$K = \frac{a_1}{a_2}; \quad t_i = \frac{t_2}{\sqrt[n]{K} + 1}$$

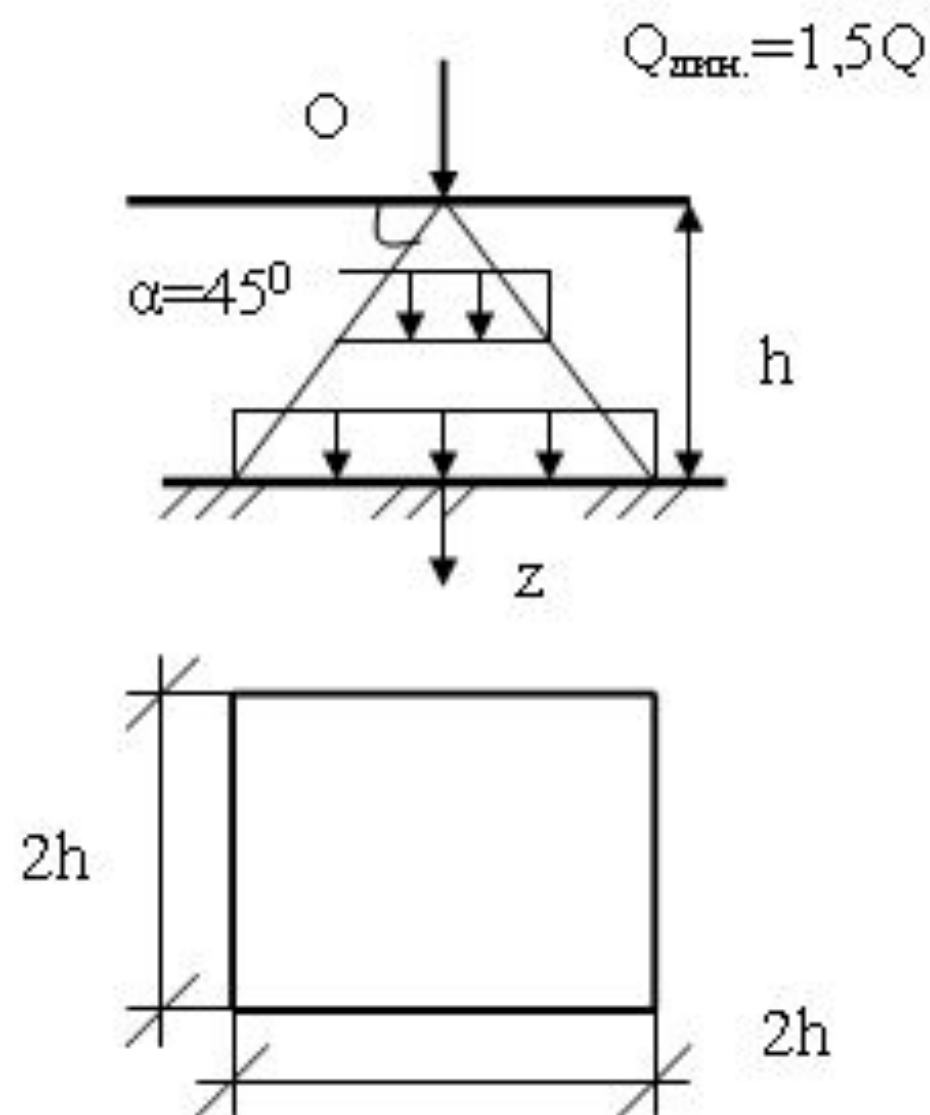
$t_{cl}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
% РЭЗР	0.5	0.5	1.0	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.5	10.5	11.5	11.5	10.5	8.5
$\Sigma$ % РЭЗР	0.5	0.51	1.03	1.13	1.79	2.54	3.83	5.18	7.69	10.94	14.04	16.54	18.77	20.05	20.78
$\Sigma$ % П РЭЗР		0.01	0.03	0.13	0.29	0.54	0.83	1.18	1.69	2.44	3.54	5.04	7.27	9.55	12.28
1	0.5		0.01	0.02	0.09	0.13	0.13	0.09	0.02	0.01					
2	0.51		0.01	0.02	0.09	0.13	0.14	0.09	0.02	0.01					
3	1.03			0.02	0.05	0.19	0.26	0.26	0.18	0.05	0.02				
4	1.13				0.02	0.06	0.20	0.28	0.28	0.20	0.07	0.02			
5	1.79					0.03	0.09	0.32	0.45	0.45	0.32	0.09	0.04		
6	2.54						0.05	0.13	0.46	0.63	0.63	0.46	0.13	0.05	
7	3.83							0.08	0.19	0.69	0.96	0.96	0.88	0.19	0.08
8	5.18								0.10	0.26	0.93	1.30	1.30	0.93	0.26
9	7.69									0.15	0.38	1.38	1.92	1.92	1.38

## **2 АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД. РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ**

**Під розрахунковою схемою конструкції розуміють її механіко-математичну модель для визначення НДС конструкції і сукупність критеріїв граничного стану елементів конструкції.**

***Наприклад, механіко-математичною моделлю залізобетонного перекриття може бути прийнято плиту, що обперта по контуру, із рівномірно розподіленим навантаженням, причому ця модель містить відомі формули для визначення напружень, деформацій і переміщень плити. У якості критеріїв граничного стану перекриття можна прийняти розтягуючі напруження в арматурі та найбільший прогин.***

**Перша розрахункова схема була запропонована в 1901 році інженером Вилей. Приймаємо, що навантаження від колеса передається на поверхню дорожнього покриття в одній точці (причому з урахуванням коливання  $Q_{\text{дин}} = 1,5Q_{\text{ст}}$ .) та рівномірно розподіляється в межах кута  $45^\circ$  на квадратну площадку. Товщину  $h$  визначали з умови, щоб тиск на ґрунт не перевищував значень, що допускаються для цього ґрунту**



$\sigma_z(z=h) \leq [\sigma_z]$  критерій граничного стану.



$$\text{Тоді } \sigma_z(z=h) = Q_{\text{дин.}} / 2h \times 2h = Q_{\text{дин.}} / 4 h^2$$

$$\text{Якщо } \sigma_z(z=h) \leq [\sigma], \text{ то } Q_{\text{дин.}} / 4 h^2 = [\sigma],$$

$$h = \sqrt{Q_{\text{дин.}} / 4 [\sigma]} = 1/2 \sqrt{Q_{\text{дин.}} / [\sigma]} \quad (5)$$

**Ця формула дозволить зробити ряд висновків:**

**Необхідна товщина приблизно пропорційна**

$$h = Q_{\text{дин.}}^{1/2};$$

**Необхідна товщина приблизно обернено**

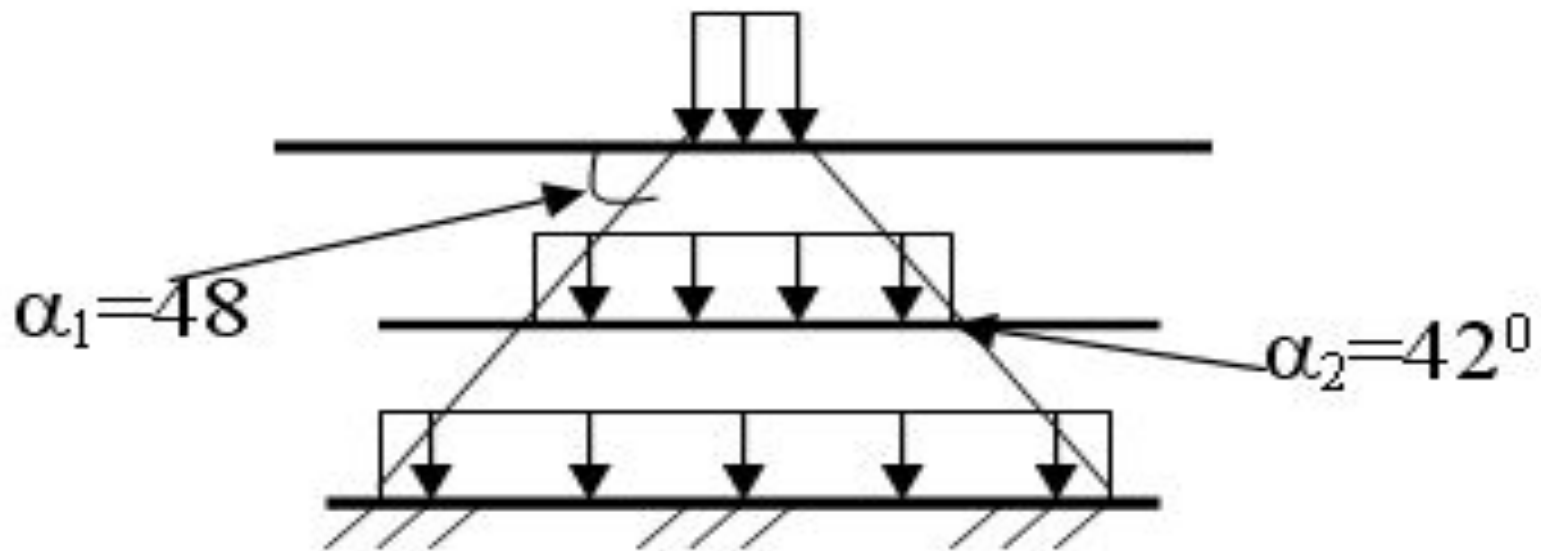
$$\text{пропорційна } h = [\sigma]^{-1/2}$$

**Звідси можливо орієнтовно оцінити необхідне підсилення при збільшенні допустимого максимального осьового навантаження і збільшення товщини дорожнього одягу на слабкому ґрунті.**

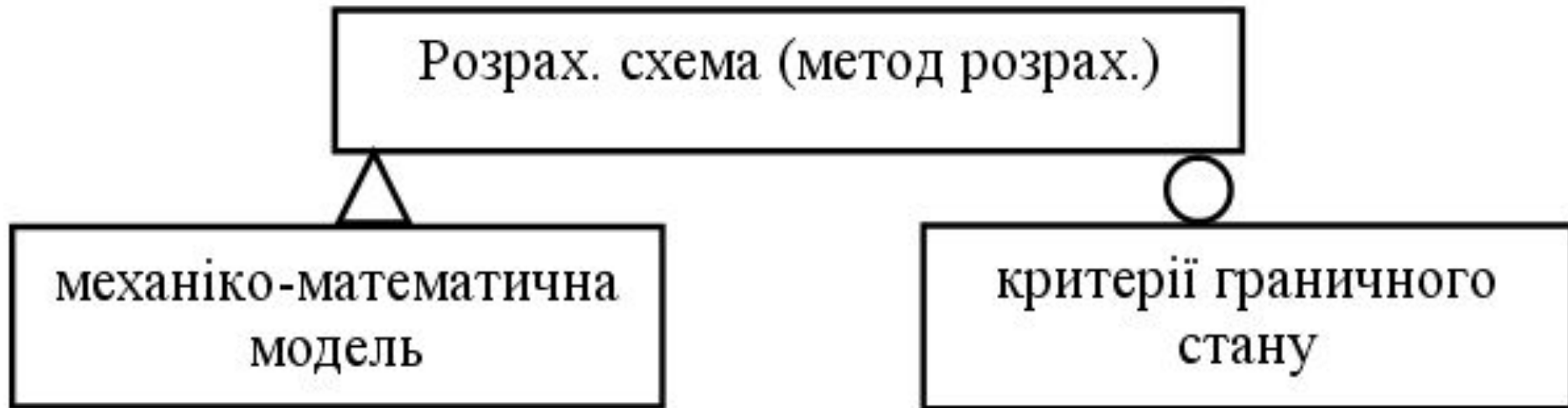
**Наприклад:  $Q=50$  кН,  $[\sigma]=0,1$  МПа,  $h=0,43$  м.**

**Фактори, що враховані при удосконаленні розрахункової схеми:**

- тиск розподіляється не по квадратній площадці, а по круговій;**
- прикладене не зосереджене навантаження, а розподілене по площі кола (це дає можливість врахувати тиск у шинах);**
- спроба врахувати вартість;**
- епюру тиску в ґрунті на одному горизонтальному рівні має форму куполу.**



**Дана схема була відправною точкою для подальших досліджень, на основі яких розроблені сучасні методи розрахунку дорожнього одягу. Як видно існують дві головні складові розрахункової схеми: теорія НДС (механіко-математична модель) і критерії граничного стану.**



**Механіко-математична модель дає рівень НДС, що має бути менше свого допустимого значення за відповідним критерієм граничного стану.**

## Запитання для контролю і засвоєння опрацьованого матеріалу

1. На чому базуються сучасні емпіричні методи розрахунку?
2. Мета експерименту AASHTO з випробувань дорожніх одягів?
3. В чому полягала методика експериментів AASHTO з випробувань дорожніх одягів?
4. Як оцінювали стан кожної секції оцінювали в експериментах AASHTO ?  
Загальний вигляд моделі деградації конструкції дорожнього одягу.
5. Емпірична залежність показника PSI від показників характеристик стану покриття.
6. Емпірична залежність для приведеної товщини.
7. Номограми та методика розрахунку товщини дорожнього одягу за результатами експериментів AASHTO.
8. Недоліки емпіричних методів.
9. Які задачі в сучасній практиці вирішуються на основі отриманих загальнонаукових закономірностей в експериментах AASHTO?
0. Що розуміють під розрахунковою схемою конструкції?
1. Перша розрахункова схема для розрахунку товщини дорожнього одягу.
2. Які фактори враховуються при удосконаленні розрахункової схеми?
3. Дві головні складові розрахункової схеми та їх суть.