

УДК 625.7/.8

Головко С. К., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-9517-7049>*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Анотація

Вступ. У роботі розглядається питання техніко-економічного аналізу альтернативних варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу. Особливо це питання актуальне під час ремонтів і реконструкції автомобільної дороги, коли необхідно розглядати питання повторного використання дорожньо-будівельних матеріалів, застосуванні геосинтетичних матеріалів тощо.

Проблематика. Досвід показує, що більшість проектувальників техніко-економічний аналіз виконує тільки за одним показником — кошторисна вартість, що пов'язано з відсутністю методології техніко-економічного аналізу таких технічних рішень.

У багатьох країнах в останні десятиріччя впроваджується концепція TBL (Triple bottom line), коли рішення аналізуються за трьома незалежними напрямками, у будівництві цей підхід досить часто формулюється як концепція «Трьох Е» (економіка, енергетика та екологія).

Мета. Розробити методику багатофакторного техніко-економічного аналізу альтернативних варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу.

Методи дослідження. За результатом пошукових досліджень запропоновано застосувати метод аналізу ієрархій.

Результати. Згідно умови задачі, розроблена ієрархічна система визначення оптимального варіанту конструкцій нежорсткого дорожнього одягу. Відповідно до розробленої ієрархічної системи визначені вектори пріоритетів незалежних факторів аналізу, що дозволяють об'єктивно оцінити спроектовані альтернативні варіанти. Пошук оптимального варіанту проводиться за незалежними факторами на основі аналізу економічних, енергетичних та екологічних показників.

Висновки. Проведене моделювання із застосуванням методу аналізу ієрархій дозволяє виконати багатофакторний аналіз альтернативних варіантів нежорсткого дорожнього одягу з визначенням оптимальної конструкції.

Ключові слова: багатофакторний аналіз, екологія, енергозбереження, метод аналізу ієрархій, нежорсткий дорожній одяг, повторне використання.

Вступ

На теперішній час, при порівнянні альтернативних варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, за основу аналізу беруть кошторисну вартість, що не дозволяє виконати об'єктивне порівняння варіантів з урахуванням перспективної довговічності конструкції, її впливу на екологію оточуючого середовища тощо.

Разом з тим, проведений аналіз показує, що в багатьох країнах впроваджується комплексний аналіз відповідно сучасної концепції потрійного критерію (Triple bottom line). Постає питання, дослідити можливість застосування системного аналізу для вибору оптимального варіанта нежорсткого дорожнього одягу, для чого використати математичний інструмент системного підходу до оптимального варіанта.

На етапі аналізу варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу (далі КНДО),

зазвичай, за основний показник порівняння приймають економічний показник (приведену вартість одного квадратного метра), але такий підхід суперечить сучасній концепції потрійного критерію (Triple bottom line (TBL)), згідно з якою при розробленні технічного рішення необхідно брати до уваги не лише економічні показники, а й енергетичні та екологічні (концепція «Трьох Е»). Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінити переваги та недоліки конкретного технічного рішення, оскільки враховує можливу зміну економічних витрат за рахунок зміни енергетичних витрат, враховує ймовірність витрат на ліквідацію негативного впливу на навколишнє середовище.

Відповідно до концепції «Трьох Е», особливу актуальність набуває аналіз варіантів ремонту дорожнього одягу, коли розглядаються питання застосування дьогтьомістких або бітумомістких матеріалів існуючого дорожнього одягу, застосування енергозберігаючих технологій (гарячий та холодний ресайклінг), енергозберігаючих добавок тощо.

За результатом пошукових досліджень для виконання комплексного аналізу варіантів КНДО застосувати метод аналізу ієрархій (далі — МАІ), який був розроблений американським математиком Т. Сааті [1, 2].

МАІ — математичний інструмент системного підходу до вирішення складних проблем прийняття рішень. Основне застосування методу полягає в підтримці прийняття рішень за допомогою ієрархічної композиції завдання та рейтингування альтернативних рішень. МАІ допомагає, знайти рішення, яке найкраще відповідає цілі та проблемі [3], забезпечує раціональну основу для структурування проблеми прийняття рішень, для представлення та кількісної оцінки її елементів, для зв'язку цих елементів із загальними цілями та для оцінки альтернативних рішень.

Згідно з умовами задачі фокусом системи є визначення оптимального варіанта КНДО. Пошук оптимального варіанта проводиться за незалежними факторами на основі аналізу економічних, енергетичних та екологічних показників (рис. 1).

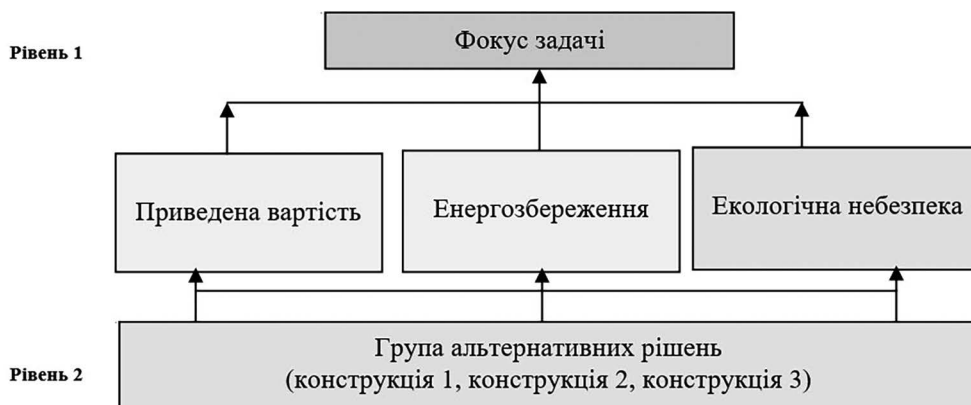


Рисунок 1 — Ієрархічна модель пошуку оптимального варіанта КНДО

Визначено такі загальні фактори:

- приведена вартість;
- енергозбереження;
- екологічна небезпека.

Після побудови ієрархії, потрібно виконати аналіз кожного загального фактора, скласти матрицю парних порівнянь і використовуючи принцип синтезу визначити показники вектора пріоритету ієрархії.

Складена матриця в загальному випадку не узгоджена. Алгебраїчно задача розрахунку матриці полягає у розв'язанні рівняння:

$$A \cdot w = G_{\max} \cdot w, \quad (1)$$

де A — множина елементів;
 w — матриця міркувань;
 G_{\max} — найбільше особисте значення матриці міркувань.

Після визначення G_{\max} , визначають індекс узгодженості:

$$IS = (G_{\max} - n)/(n - 1), \quad (2)$$

де n — число елементів, що порівнюються.

Якщо розділити індекс узгодженості на число, відповідне імовірній узгодженості матриці (того ж порядку), отримаємо відношення узгодженості (OS). Рішення матриці буде припустимим, якщо виконується умова:

$$OS \leq 0,10. \quad (3)$$

Відповідно до визначених факторів аналізу, визначимо їх вектори пріоритету (**табл. 1**).

Таблиця 1

Фактори	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека	Вектор пріоритету	Показник узгодження
Приведена вартість	1	2	2	0,42	$G_{\max} = 3,00$
Енергозбереження	1/2	1	2	0,32	$JS = 0,0004$
Екологічна небезпека	1/2	1/2	1	0,24	$OS = 0,0007$

Нижче наведені результати розрахунків згідно з [4, 5] ремонту дорожнього одягу капітального типу з використанням матеріалів існуючого дорожнього одягу.

Існуюча конструкція складається з наступних шарів:

- асфальтобетонне покриття товщиною 5 см;
- верхній шар основи з асфальтобетону товщиною 5 см;
- чорний щебінь товщиною 10 см;
- щебенево-піщана суміш товщиною до 15 см;
- пісок товщиною до 15 см;
- ґрунт земляного полотна (суглинок важкий пілуватий).

Вихідні умови проектування:

- Кіровоградська область;
- категорія автомобільної дороги — І-б;
- покриття — ЩМА-15 на БМПА 60/90-53 ;
- розрахункове осьове навантаження — 115 кН;
- потрібний модуль пружності — 280 МПа.

Відповідно до результатів інструментального обстеження встановлено, що фактичний модуль пружності становить 160 МПа. Враховуючи, що мінімальний модуль пружності для доріг І-б категорії повинен становити 250 МПа, необхідно виконати ремонт дорожнього одягу.

Перед виконанням розрахунків визначено, що після фрезерування існуючого дорожнього одягу на глибину 10 см, модуль пружності основи становить близько 90 МПа, а при фрезеруванні на глибину 20 см — 75 МПа.

Розроблено два варіанта ремонту дорожнього одягу за традиційним та альтернативним

підходом для автомобільної дороги з покриттям одягу капітального типу.

Варіант 1

Передбачається фрезерування асфальтобетонних шарів на глибину до 10 см з подальшим виготовленням МДХР.КВ.Кз.М20 — ДСТУ 8976 за технологією холодного ресайклінгу «в установці» з додаванням нового матеріалу (40 % за масою) з використанням комплексного в'язучого (рис. 2).

1. ЩМА-15 згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2015 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-313:2016 — 5 см.

Підгрунтовка — ЕКШМ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 — 0,4 л/м².

2. Асфальтобетон.АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І.БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ 8959:2019 — 10 см.

3. Асфальтобетон.АСГ.Кр.П.А-Б.НП.І.БНД 70/100 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 — 10 см.

Підгрунтовка — ЕКШ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 — 0,4 л/м²;

4. МДХР.КВ.Кз.М20 — ДСТУ 8976 матеріал дорожній, виготовлений за технологією холодного ресайклінгу за технологією «в установці» з додаванням нового матеріалу (50 % за масою) з використанням мінерального в'язучого — 0,18 см.

5. Основа дорожнього одягу (після фрезерування на глибину 10 см).



Рисунок 2 — Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (варіант 1)

Варіант 2

Передбачається фрезерування асфальтобетонних шарів на глибину 5 см з подальшим влаштуванням шару з ЩПС40 укріпленою цементом до марки М20 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-39:2016 (рис. 3).

1. ЩМА-15 згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2015 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-313:2016 — 5 см.

Підгрунтовка — ЕКШМ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 — 0,4 л/м².

2. Асфальтобетон.АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І.БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ 8959:2019 — 10 см.

3. Асфальтобетон.АСГ.Кр.П.А-Б.НП.І.БНД 70/100 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 — 10 см.

Підґрунтовка — ЕКШ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 — 0,4 л/м².

4. ЩПС40 укріпленою цементом до марки М20 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-39:2016 за технологією «в установці» – 0,18 см.
5. Основа дорожнього одягу (після фрезерування на глибину 5 см).



Е, С, R - МПа; F - град.

Рисунок 3 — Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (варіант 2)

Варіант 3

Передбачається пошарове фрезерування асфальтобетонних шарів. Перший шар на глибину 4 см із подальшим транспортуванням на АБЗ для виготовлення асфальтобетонної суміші АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І за технологією гарячого ресайклингу «в установці» [6] з використанням асфальтобетонної крихти (до 40 % за масою). Другий шар фрезерують на глибину 6 см із подальшим транспортуванням до установки для виготовлення суміші за технологією холодного ресайклингу за технологією «в установці» з додаванням нового матеріалу (до 40 % за масою) з використанням органічного в'язучого в емульгованому стані. Третій шар фрезерується на глибину 10 см з подальшим виготовленням МДХР.КВ.Кз.М20 — ДСТУ 8976 за технологією холодного ресайклингу «на дорозі» з додаванням нового матеріалу (до 50 % за масою) з використанням мінерального в'язучого (**рис. 4**).

1. ЩМА-15 згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2015 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-313:2016 — 5 см.

Підґрунтовка — ЕКШМ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 — 0,4 л/м².

2. Асфальтобетон.АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-313:2016 виготовлений за технологією гарячого ресайклингу за технологією «в установці» з додаванням нового матеріалу (40 % за масою) — 10 см.

3. МДХР.ОВ–ЕС.Кз–ДСТУ 8976 матеріал дорожній, виготовлений за технологією холодного ресайклингу за технологією «в установці» з додаванням нового матеріалу (40 % за

масою) з використанням органічного в'язучого в емульгованому стані — 0,10 см.

4. МДХР.КВ.Кз.М20–ДСТУ 8976 матеріал дорожній, виготовлений за технологією холодного ресайклінгу за технологією «на дорозі» з додаванням нового матеріалу (50 % за масою) з використанням мінерального в'язучого — 0,18 см.

5. Основа дорожнього одягу (після фрезерування на глибину 20 см).



Рисунок 4 — Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (варіант 3)

Результати розрахунку (див. **рис. 2–4**) показують, що наведені варіанти конструкцій дорожнього одягу відповідають вимогам [5] за усіма критеріями міцності. У варіанті 3 за рахунок більшої глибини фрезерування існуючого дорожнього одягу, вдасться ліквідувати накопичені дефекти та руйнування у шарах існуючої основи, що у подальшому забезпечить більшу довговічність дорожньому одягу [7, 8].

На другому етапі розв'язання задачі виконаємо короткий опис варіантів розрахованих КНДО.

Варіант 1. Кошторисна вартість, приведена до одного квадратного метра, становить 2 906 грн. Енергетичні витрати зменшуються на складову транспортування частини нового кам'яного матеріалу у зв'язку з повторним використанням асфальтобетонної крихти (20 %). За рахунок посилення основи влаштування шарів із МДХР та пористого асфальтобетону довговічність основи суттєво підвищується і за експертною оцінкою становить близько 24 років, що в перспективі знизить енерговитрати при наступному капітальному ремонті (10 %). Екологічна небезпека також зменшується у зв'язку з використанням бітомінерального матеріалу шляхом виготовлення МДХР, що унеможливить попадання старого бітуму у ґрунтові води (20 %).

Варіант 2. Кошторисна вартість, приведена до одного квадратного метра, становить 3 020 грн. Енергетичні витрати зменшуються на складову меншої глибини фрезерування (на 5 %). За рахунок посилення основи влаштування шарів із ЩПС укріпленого цементом і пористого

асфальтобетону довговічність основи суттєво підвищується і за експертною оцінкою становить близько 24 років, що в перспективі знизить енерговитрати при наступному капітальному ремонті (на 10 %). Екологічна небезпека посилюється (на 30 %) у зв'язку з використанням бітомінерального матеріалу при влаштуванні узбіччя, що може призвести до попадання старого бітуму у ґрунтові води.

Варіант 3. Кошторисна вартість, приведена до одного квадратного мера, становить 2 950 грн. Енергетичні витрати зменшуються на складову транспортування частини нового кам'яного матеріалу у зв'язку з повторним використанням асфальтобетонної крихти (30 %). За рахунок посилення основи влаштуванням шарів із МДХР довговічність основи підвищується і за експертною оцінкою становить близько 16 років, що в перспективі знизить енерговитрати при наступному капітальному ремонті (5 %). Екологічна небезпека також зменшуються у зв'язку з використанням бітомінерального матеріалу шляхом виготовлення МДХР для двох шарів, що унеможливить попадання старого бітуму у ґрунтові води (30 %).

На основі визначених варіантів виконаємо аналіз альтернативних варіантів ремонту КНДО за кожним із факторів (табл. 2). Попарне порівняння може виконуватись як за фактичними, так і експертними оцінками у балах. Приймаючи до уваги, що мета розрахунку полягає у перевірці моделі з визначеними факторами оцінки та встановленим вектором пріоритету, було вирішено порівняння виконати за оцінкою у балах (згідно шкали розробленої Т. Сааті [2]).

Таблиця 2

Варіанти	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Вектор пріоритету	Показник узгодження
Кошторисна вартість (бали)					
1	1	3	2	0,53	$G_{\max} = 3,006$
2	1/3	1	2	0,16	$JS = 0,003$
3	1/2	1/2	1	0,30	$OS = 0,005$
Енергозбереження (бали)					
1	1	2	1/3	0,22	$G_{\max} = 3,001$
2	1/2	1	1/5	0,13	$JS = 0,0008$
3	3	5	1	0,64	$OS = 0,0015$
Екологічна небезпека (бали)					
1	1	3	1/3	0,23	$G_{\max} = 3,120$
2	1/3	1	1/5	0,10	$JS = 0,064$
3	3	7	1	0,67	$OS = 0,107$

Проведені розрахунки загального вектора пріоритету наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати обчислення

Номер варіанта	Локальні пріоритети		
	Економічні витрати	Енергозбереження	Екологічна небезпека
1	0,58	0,22	0,35
2	0,13	0,13	0,10
3	0,27	0,64	0,51

Обчислення загального пріоритету варіантів:

Варіант 1: $0,42 \cdot 0,5 + 0,32 \cdot 0,22 + 0,24 \cdot 0,23 = 0,35$

Варіант 2: $0,42 \cdot 0,16 + 0,32 \cdot 0,13 + 0,24 \cdot 0,1 = 0,15$

Варіант 3: $0,42 \cdot 0,3 + 0,32 \cdot 0,64 + 0,24 \cdot 0,67 = 0,50$

На основі проведених розрахунків визначено, що варіант 3 має самий більший пріоритет. Це ймовірно пов'язано з тим, що даний варіант КНДО не вимагає значних коштів порівняно з іншими варіантами, а для виготовлення матеріалів основи передбачає значний обсяг повторного застосовано бітумомістких матеріалів, що дозволило за факторами «Енергоємність» та «Екологічна безпека» випередити інші варіанти КНДО, які розглядалися.

Висновки

За результатом пошукових досліджень запропоновано для виконання комплексного аналізу варіантів КНДО застосувати метод аналізу ієрархій, який забезпечує раціональну основу для структурування проблеми прийняття рішень, для представлення та кількісної оцінки її елементів, для зв'язку цих елементів із загальними цілями та для оцінки альтернативних рішень.

Згідно з умовами задачі фокусом системи є визначення оптимального варіанта КНДО. Пошук оптимального варіанта проводиться за незалежними факторами на основі аналізу економічних, енергетичних та екологічних показників. Визначені наступні загальні фактори: кошторисна вартість; енергозбереження; екологічна безпека та визначені їх вектори пріоритету.

Для апробації розробленої системи було виконано розрахунок альтернативних варіантів КНДО.

За результатом розрахунку встановлено, що варіант який передбачає найбільшу кількість повторного застосування матеріалів існуючого дорожнього одягу визначений як оптимальний. Це відповідає сучасній концепції «Трьох Е», оскільки за двома із трьох критеріїв оптимальний варіант має найвищий пріоритет.

Список літератури

1. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Москва, 1991. 220 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва, 1993. 278 с.
3. Головка С.К. Раціональні способи повторного використання асфальтобетону при реконструкції автомобільних доріг : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Київ, 1998. 203 с.
4. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 115 с. (Інформація та документація).
5. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Київ, 2019. 112 с. (Інформація та документація).
6. Рециклювання дорожніх одягів. Ч. 1–3. Під редакцією В. Жданюка і Д. Сибільського, Харків, 2006.
7. Головка С.К. Нові підходи у підвищенні капітальності дорожніх одягів при їх ремонті *Дороги і мости*. Вип. 22 С. 86–94. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.086>.
8. Головка С. К. Дослідження способів повторного використання дорожньо-будівельних матеріалів при ремонті дорожніх одягів капітального типу. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.060>.

References

1. Saati T., Kerns K. Analiticheskoe planirovaniye. Moscow, 1991. 220 p. [in Russian].
2. Saati T. Pryniatye resheniya. Metod analiza yerarkhyi. Moscow, 1993. 278 p. [in Russian].
3. Holovko S.K. Ratsionalni sposoby povtornoho vykorystannia asfaltobetonu pry rekonstruktsii

avtomobilnykh doroh [Rational methods of reuse of asphalt concrete in the reconstruction of roads]. PhD. Kyiv, 1998. 203 p. [in Ukrainian].

4. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. HBN V.2.3-37641918-559:2019 Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia (Departmental Building Norms (HBN V.2.3-37641918-559:2019) Non rigid pavement. Designing). Kyiv, 2019. 69 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. Retsykliuvannia dorozhnykh odiahiv. Ch. 1–3. Pid redaktsiieiu V. Zhdaniuka i D. Sybils'koho, Kharkiv, 2006. 123 p. [in Ukrainian].

7. Sergey Golovko New approaches to increase the capitality of pavements in their repair. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2020. Iss. 22. P. 86–94 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.086> [in Ukrainian].

8. Sergey Golovko. Investigation of the recycling methods of the road construction materials during the repair of the road pavements of the capital type. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. 2021. Iss. 24. P. 60–71 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.060> [in Ukrainian].

Serhii Holovko, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-9517-7049>

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF NON-RIGID PAVEMENT DESIGN OPTIONS USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

Abstract

Introduction. The study considers the issue of technical and economic analysis of alternative design options of non-rigid pavement. This issue is especially relevant during the repairing and reconstruction of roads, when it is need to consider the reuse of road construction materials, the use of geosynthetic materials, and so on.

Problem statement. Experience shows that most designers perform technical and economic analysis by one indicator only- the estimated cost, which is due to the lack of methodology for technical and economic analysis of such technical solutions.

In many countries, the concept of TBL (Triple bottom line) has been implemented in recent decades, when solutions are analyzed in three independent areas, in construction this approach is often formulated as “Three E” concept (economics, energy and environment).

Purpose. To develop a method of multifactor technical and economic analysis of alternative design options of non-rigid pavement.

Methods of study. According to the results of exploratory researches, it is proposed to apply the method of analysis of hierarchies.

Results. According to the problem sttement, a hierarchical system for determination of the optimal design option of non-rigid pavement is developed. According to the developed hierarchical system, the vectors of priorities of independent factors of analysis are determined, which allow to evaluate objectively the designed alternative options. The searching for the best option is performing by independent factors based on the analysis of economic, energy and environmental indicators.

Conclusions. Performed modeling using the method of hierarchy analysis allows to make a multifactor analysis of alternative options of non-rigid pavement with the definition of the optimal design.

Keywords: multifactor analysis, ecology, energy saving, hierarchy analysis method, non-rigid pavement, reuse.
