

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АСФАЛЬТОПОЛІМЕРБЕТОНУ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ПОЛІМЕРУ

Маляр В.В.¹,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. На основі розрахунків техніко-економічної ефективності використання полімерного модифікатора СБС встановлено, що здорожчання таких сумішей не окупається збільшенням строків служби покриття. Але, за рахунок можливості зменшення товщини шару, використання асфальтобетонної суміші з 5 % полімерного модифікатора економічно доцільним.

Ключові слова: асфальтобетон, полімерний модифікатор, конструкція дорожнього одягу, економічна ефективність.

Вступ

За своїми показниками якості асфальтобетони повинні відповідати реальним транспортним навантаженням і погодно-кліматичним факторам. Проектувальники і виробники асфальтобетонних сумішей застосовують нові ефективні компоненти, що визначають склад асфальтобетонних сумішей. На сьогодні для поліпшення якості асфальтобетонних сумішей у всьому світі прийнято вважати використання в їх складі наступних компонентів: кубоподібного щебеню; модифікованих бітумів; модифікуючих добавок; стабілізуючих добавок; адгезійних добавок; структуруючих добавок; активованих мінеральних матеріалів і в'язучих [1]. Всі ці способи по-різному впливають на одержання кінцевого продукту із заданими властивостями, а саме – на властивості асфальтобетону. При цьому вартість асфальтобетонних сумішей, отриманих різними способами, буде також відрізнятися. Тому постає питання вибору найбільш ефективного способу з точки зору забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик асфальтобетону та економічних показників. Також необхідно враховувати, що основний показник ефективності – це довговічність асфальтобетону, котра і визначає строк його служби без появи певної кількості дефектів, що знижують техніко-експлуатаційний стан покриття.

Аналіз публікацій

Багато наукових праць присвячені властивостям бітумів, модифікованих полімерами, і асфальтобетонів на їх основі, ефективність яких для доріг вищих категорій підтверджується стійким збільшенням обсягів їх застосування у промислово розвинених країнах. На основі результатів порівняльних досліджень і світової практики пріоритетну увагу

приділено бітумам із добавками полімерів типу стирол-бутадієн-стирол (СБС) [2].

Розрахунок техніко-економічної ефективності використання асфальтополімербетонної суміші з використанням полімеру СБС можна виконувати за методикою [3]. Її суть полягає у наступному. Річний економічний ефект E від створення та використання дорожнього покриття з більш високоякісної асфальтобетонної суміші (у т.ч. з полімерним модифікатором) визначається на основі даних строків роботи покриття за формулою

$$E = [(Z_1 + Z_{16})\varphi + E_e - (Z_2 + Z_{26})]A_2, \quad (1)$$

де Z_1 і Z_2 – наведені витрати на приготування матеріалів за варіантами, що порівнюються; E_e – економія в сфері експлуатації дорожніх покриттів за весь строк їх служби (може бути прийнятий як нуль, якщо припускати, що дорожнє покриття відпрацює весь строк служби без появи деформацій); Z_{16} і Z_{26} – наведені витрати на влаштування покриття за варіантами, що порівнюються; A_2 – річний об'єм будівельно-монтажних робіт із використанням нових дорожніх покриттів в розрахунковому році; φ – коефіцієнт зміни строку служби нового дорожнього покриття в порівнянні з базовим варіантом, що розраховується за формулою

$$\varphi = (C_1 + E_n) / (C_2 + E_n), \quad (2)$$

де C_1 і C_2 – частки кошторисної вартості дорожніх покриттів у розрахунку на один рік їх роботи за варіантами, що порівнюються, залежно від строків роботи; E_n – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень, рівний 0,15.

Виходячи з (1) було отримано залежність для визначення частки кошторисної вартості дорожнього покриття в розрахунку на один рік його роботи з урахуванням нормативного коефіцієнта порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень [3]

$$P_{\text{ен}} = C + E_{\text{н}} = f(P), \quad (3)$$

де P – загальний рівень надійності асфальтобетону дорожнього покриття, що визначається як

$$P = (P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n)^{1/n}, \quad (4)$$

де $P_1, P_2 \dots P_n$ – частинні рівні надійності, що відповідають коефіцієнтам запасу міцності за різними критеріями.

Встановити зв'язок коефіцієнтів запасу і рівня надійності можна експериментально шляхом будівництва дослідних ділянок дорожніх одягів (або покриттів із різними властивостями), що мають різні коефіцієнти запасу з наступним тривалим наглядом за розвитком деформацій і визначенням рівня надійності за спеціальними формулами. Потім отримані дані піддаються статистичній обробці, в результаті отримують залежність коефіцієнтів запасу і рівня надійності.

Згідно методики [3] нормативні значення фізико-механічних властивостей повинні відповідати строку служби дорожнього покриття, рівному 10 років. Тоді для подальших розрахунків використовують емпіричну формулу для визначення частки кошторисної вартості дорожнього покриття $P_{\text{ен}}$

$$P_{\text{ен}} = C + E_{\text{н}} = 0,22 \cdot I^{-0,75}. \quad (5)$$

Для спрощення проведення випробувань і розрахунків загальний рівень надійності I може бути виражений через показники фізико-механічних властивостей асфальтобетону, що відповідають критеріям зсувостійкості I_1 , тріщиностійкості I_2 , корозійної стійкості I_3 та ін.

$$I = (I_1 \cdot I_2 \cdot I_3)^{1/3}. \quad (6)$$

Далі визначається показник ефективності від зміни строку роботи асфальтобетону в дорожній конструкції β (7), котрий показує, у скільки разів асфальтополімербетонна суміш може бути дорожче асфальтобетонної суміші.

$$\beta = P_{\text{ен}}^0 / P_{\text{ен}}^1, \quad (7)$$

де $P_{\text{ен}}^0$ – частка кошторисної вартості базового варіанта (асфальтобетону); $P_{\text{ен}}^1$ – частка кошторисної вартості асфальтополімербетону.

Вартість асфальтополімербетонної суміші не може бути вище більш ніж у β разів із точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності, в порівнянні з асфальтобетонном. Тобто повинна виконуватись умова

$$\frac{C_1}{C_0} \leq \beta, \quad (8)$$

де C_1 – вартість 1 тонни асфальтополімербетону; C_0 – вартість 1 тонни асфальтобетону.

При порівнянні деяких складів асфальтобетонних сумішей, що мають підвищені показники фізико-механічних властивостей, обирають склад, котрий має найбільше значення β (більше 1,00), у разі виконання умови (8).

Дана методика враховує тільки вартість асфальтобетонних сумішей з різними добавками. Водночас зазначається, що доцільно було б враховувати можливі зміни розмірів шарів конструкцій дорожнього одягу з використанням нового матеріалу.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є розрахунок техніко-економічної ефективності використання різної кількості полімерного модифікатора за зазначеною методикою та врахування зміни пружних властивостей асфальтополімербетону у проектуванні конструкції дорожнього одягу.

Розрахунок техніко-економічної ефективності

Як об'єкти дослідження були обрані асфальтополімербетони з різним вмістом полімеру СБС. Між собою вони суттєво відрізнялися фізико-механічними властивостями [4] та вартістю. Були досліджені стандартні властивості бітумополімерів і асфальтобетонів на їх основі та визначені розрахункові характеристики останніх на вібростенді ХНАДУ. Розраховано калькуляції вартості асфальтобетонів із різним вмістом полімерів за методикою [5] та виконано розрахунки конструкцій дорожніх одягів з використанням асфальтополімербетонів у верхніх шарах. Аналіз калькуляцій виробництва асфальтополімербетонних сумішей показує, що виробнича собівартість значною мірою збільшується з підвищенням вмісту полімеру. На

зріст ціни асфальтополімербетонної суміші в основному впливає здороження бітумополімерного в'язучого (рис. 1). Його оптималь-

ний вміст збільшується з підвищенням кількості добавки полімеру.

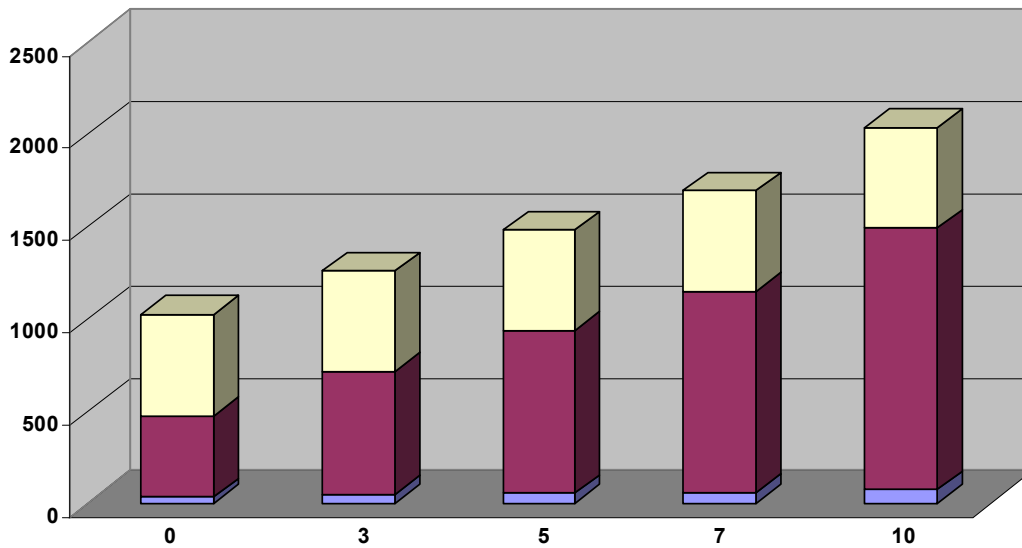


Рис. 1. Залежність собівартості (грн.) асфальтополімербетонних сумішей від вмісту полімеру у в'язучому (%): нижній ряд – вартість нагріву матеріалів у процесі приготування асфальтобетону; середній ряд – вартість в'язучого; верхній ряд – інші виробничі витрати

Таблиця 1 – Властивості асфальтобетонів

Показник властивостей	Нормативні значення	Склад асфальтобетону (відсоток полімеру СБС)				
		№1 (0 %)	№2 (3 %)	№3 (5 %)	№4 (7 %)	№5 (10 %)
R_{50} , МПа	1,3	2,18	2,45	2,52	2,64	2,78
$T_{кр}$, °С	-15	-20	-20	-18	-28	-37
W , %	3,0	3,0	2,6	1,7	1,3	0,5

Вартість 1 тонни асфальтобетонних сумішей (С) для складів: № 1 (0 % СБС) – 1409,09 грн; № 2 (3 % СБС) – 1740,54 грн; № 3 (5 % СБС) – 2046,81 грн; № 4 (7 % СБС) – 2337,67 грн; № 5 (10 % СБС) – 2809,16 грн.

В роботі оцінювали окремі рівні надійності таким чином: $I_1 = R_{50}/R_{50}^н$ – як відношення міцності асфальтобетону при 50 °С до його нормативного значення; $I_2 = T_{кр}/T_{кр}^н$ – як відношення температури крихкості в'язучого до її нормативного значення; $I_3 = W^н/W$ – як зворотне відношення водонасичення асфальтобетону до його нормативного значення.

Характеристики асфальтобетонів, що взяті для розрахунків, наведені в табл. 1; визначення показників ефективності наведено в табл. 2.

З точки зору забезпечення поліпшення показників надійності (за критеріями зсувостійкості, температурної тріщиностійкості та

корозійної стійкості) тільки відносна вартість асфальтобетону з бітумом, модифікованим 10 % полімеру СБС, менша за показник β (практично дорівнює).

Таблиця 2 – Визначення показників ефективності

Показник властивостей	Склад асфальтобетону (відсоток полімеру СБС)				
	№1 (0 %)	№2 (3 %)	№3 (5 %)	№4 (7 %)	№5 (10 %)
I_1	1,68	1,88	1,94	2,03	2,14
I_2	1,33	1,33	1,20	1,87	2,47
I_3	1,0	1,15	1,76	2,31	6,0
I	1,31	1,42	1,60	2,06	3,16
$R_{ен}$	0,18	0,169	0,154	0,128	0,09
β	1,0	1,07	1,17	1,41	2,0
C_1/C_0	1,0	1,235	1,452	1,659	1,99
$C_{1ш}/C_{0ш}$	1,0	1,068	1,055	1,448	2,036

Враховуючи те, що деформаційні характеристики асфальтополімербетону на бітумі, модифікованому 10 % полімеру СБС, у незначній мірі відрізняються від асфальтобетону [4], зменшення товщини шару є неможливим.

Таким чином, аналіз вартості показує, що за таким розрахунком здешевлення практично не спостерігається. Тому пропонується в методиці враховувати не вартість асфальтобетонної суміші, а вартість асфальтобетону верхнього шару, з урахуванням його товщини.

Для аналізу впливу вмісту полімерного модифікатора бітуму на особливості конструкцій дорожнього одягу були зроблені розрахунки п'яти варіантів конструкцій. За базовий варіант взято конструкцію дорожнього одягу з додатка ВБН «Дорожній одяг нежорсткого типу» [6]. Далі змінювали верхній асфальтобетонний шар на шар з асфальтополімербетону з різною кількістю полімеру.

1-й варіант. Конструкція та розрахункові значення матеріалів наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Базова конструкція дорожнього одягу

Матеріал шару	h шару, см	Розрахунок за		
		пружним прогином, E_1 , МПа	опором зсуву, E_2 , МПа	опором розтягу при згині E_3 , МПа
1. Асфальтобетон щільний на бітумі БНД-90/130	7	3030	1680	5440
2. Асфальтобетон пористий на бітумі БНД-40/60	8	2800	1700	3600
3. Асфальтобетон пористий на бітумі БНД-60/90	10	2000	1200	2800
4. Гравійно-піщана суміш оптимального складу, що укріплена цементом	22	530	530	530
5. Рядовий шлаковий щебінь	26	200	200	200
6. Суглинок легкий пілуватий з $W_p = 0,6 W_T$	–	77	77	77

2-й варіант. Використання у першому шарі асфальтополімербетону ($h=6$ см) на модифікованому бітумі марки БНД 90/130 з 3 % полімеру, що дорівнює зменшенню об'єму використання асфальтополімербетону до 14,3 % ($E_1 = 3790$ МПа, $E_2 = 2290$ МПа, $E_3 = 6320$ МПа).

3-й варіант. Використання у першому шарі асфальтополімербетону ($h = 5$ см) на модифікованому бітумі марки БНД 90/130 з 5 % полімеру, що дорівнює зменшенню об'єму використання асфальтополімербетону до 28,6 % ($E_1 = 4740$ МПа, $E_2 = 3030$ МПа, $E_3 = 7420$ МПа).

4-й варіант. Використання у першому шарі асфальтополімербетону ($h = 6$ см) на модифікованому бітумі марки БНД 90/130 з 7 % полімеру ($E_1 = 3940$ МПа, $E_2 = 2540$ МПа, $E_3 = 6100$ МПа).

5-й варіант. Використання у першому шарі асфальтополімербетону ($h = 7$ см) на модифікованому бітумі марки БНД 90/130 з 10 % полімеру ($E_1 = 3300$ МПа, $E_2 = 2240$ МПа, $E_3 = 4900$ МПа).

Значення модулів пружності асфальтополімербетонів отримані в [4]. Результати розрахунків конструкцій дорожніх одягів наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів запасу міцності для порівняння конструкцій дорожніх одягів

Варіант / h_1 / вид в'язучого	Коефіцієнт запасу, $K_{мц}$, для критеріїв граничного стану		
	пружний прогин	зсув у нез'язних шарах	згин монолітних шарів
Нормативний	1,50	1,51	1,39
1-й варіант $h_1 = 7$ см БНД90/130	1,94	1,51	1,49
2-й варіант $h_1 = 6$ см БНД90/130 + 3 % СБС	1,91	1,518	1,42
3-й варіант $h_1 = 5$ см БНД90/130 + 5 % СБС	1,73	1,51	1,39
4-й варіант $h_1 = 6$ см БНД90/130 + 7 % СБС	1,93	1,525	1,43
5-й варіант $h_1 = 7$ см БНД90/130 + 10 % СБС	1,89	1,535	1,50

Отримані дані розрахунків свідчать про те, що використання у верхньому шарі асфальтополімербетону приводить до підвищення коефіцієнтів запасу міцності дорожнього одягу за критерієм пружного прогину. Це дає можливість зменшити товщини шару (2-й, 3-й та 4-й варіанти). Використання бітуму меншої в'язкості вплине на підвищення температурної тріщиностійкості асфальтополімербетонного покриття за рахунок нижчого значення температури крихкості вхідного бітуму. Більший вміст полімеру також призводить до зниження температури крихкості в'язучого.

Асфальтополімербетонні шари дорожньої конструкції з 3, 5 та 7 % полімеру СБС можуть бути зменшені відповідно на 14, 28 та 14 %.

Економічний ефект, за зміни товщини шарів, будемо розраховувати з урахуванням співвідношення вартості асфальтополімербетону до вартості асфальтобетону, що знаходиться у верхньому шарі оптимальної конструкції дорожнього одягу. Вартість асфальтобетону (асфальтополімербетону) для улаштування шару дорожнього покриття буде

$$C_{\text{ш}} = l \cdot b \cdot h \cdot \rho \cdot C, \quad (9)$$

де l , b , h – довжина, ширина та товщина асфальтобетонного (асфальтополімербетонного) шару; ρ – середня щільність асфальтобетону (асфальтополімербетону); C – вартість 1 тонни асфальтобетону (асфальтополімербетону).

Так, вартість асфальтобетону для улаштування верхнього шару 1 км дороги першої категорії ($C_{\text{ш}}$) буде: для 1-го варіанта (0 % полімеру) – 3506 тис. грн; для 2-го варіанта (3 % полімеру) – 3744 тис. грн; для 3-го варіанта (5 % полімеру) – 3700 тис. грн; для 4-го варіанта (7 % полімеру) – 5076 тис. грн; для 5-го варіанта (з 10 % полімеру) – 7138 тис. грн.

Аналіз даних табл. 2 показує, що склад асфальтополімербетону №3 з 5 % полімерного модифікатора в бітумі є найбільш економічно ефективним, з урахуванням зменшення його товщини шару (різниця між $C_{1\text{ш}}/C_{0\text{ш}}$ та β є найбільшою).

При цьому розрахунковий строк роботи покриття з такого асфальтополімербетону буде більший у 1,22 разу, у порівнянні з асфальтобетоном

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{I_1}{I_0}, \quad (10)$$

де T_1 – строк служби нового матеріалу; T_0 – строк служби матеріалу базового варіанта; I_1 – загальний рівень надійності нового матеріалу; I_0 – загальний рівень надійності матеріалу базового варіанта.

Таким чином, з точки зору забезпечення необхідних показників фізико-механічних властивостей, продовження терміну служби дорожнього покриття й отримання за рахунок цього економічного ефекту – асфальтобетонна суміш на бітумі, модифікованому 5 % полімерами типу СБС – є ефективним, а витрати, понесені за рахунок застосування

більш дорогого бітумополімеру, окупляться. Оптимальним є варіант використання такої кількості модифікатора тільки за зменшення товщини шару дорожнього покриття.

Висновки

Модифікація бітуму полімером до 5 % включно підвищує пружні властивості асфальтобетону; зі збільшенням кількості полімеру від 7 до 10 % модуль пружності знижується. На основі розрахунків дорожнього одягу показано можливість зменшення товщини верхнього шару дорожньої конструкції до 28 % у разі використання асфальтополімербетону з 5 % полімерного модифікатора.

На основі розрахунків економічної ефективності використання модифікаторів встановлено, що здорожчання таких сумішей не окупається збільшенням строків служби покриття. Але, за рахунок можливості зменшення товщини шару, використання асфальтобетонної суміші з 5 % полімерного модифікатора є економічно доцільним.

Література

1. Веренько В.А., Занкович В.В. Как получить экономически эффективные асфальтобетонные смеси для устройства конструктивных одежд автомобильных дорог и улиц. *Вестник БНТУ*. 2009. №3. С. 23–29.
2. Золотарев В.А. Технические, реологические и поверхностные свойства битумов. Избранные труды. Том 2. Санкт-Петербург: Славутич, 2013. 149 с.
3. Веренько В.А. Опыт применения модифицированных битумов и асфальтобетонов в Республике Беларусь. *Вестник ХНАДУ*. 2017. Вып. 79. С. 84–86.
4. Zolotaryov V.A., Maliar V.V., Lapchenko A.S. The effect of SBS polymer content on technical, technological, and rheological properties of bitumens and polymer asphalt concretes. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 1–3 June 2011, P. 164–176.
5. Мальяр В.В., Кондратьева І.Г., Оксак С.В. Методичні вказівки до економічної частини дипломних проектів з технології виробництва дорожньо-будівельних матеріалів. – Харків: ХНАДУ, 2012. 24 с.
6. ВБН В.2.3-218-186-2004. Дорожній одяг нежорсткого типу. [Чинний від 2005-01-01]. Вид. офіц. К. 2004. 137 с.

References

1. Veren'ko V.A., Zankovich V.V. (2009). Kak poluchit' jekonomicheski jeffektivnye asfal'tobetonnye smesi dlja ustrojstva konstruktivnyh odezhd avtomobil'nyh dorog i ulic [How to get

- cost-effective asphalt mixes for the design of constructive clothing of roads and streets.] *Vestnik BNTU*. №3. 23-29. [in Russian].
2. Zolotarev V.A. (2013). *Tehnicheskie, reologicheskie i poverhnostnye svojstva bitumov. Izbrannye trudy. Tom 2.* [Technical, rheological and surface properties of bitumen. Selected Works. Vol. 2] Sankt-Peterburg: Slavutich. [in Russian].
 3. Veren'ko V.A. (2017). *Opyt primenenija modifitsirovannyh bitumov i asfal'tobetonov v respublike Belarus'* [Experience of using modified bitumen and asphalt concrete in the Republic of Belarus.]. *Vestnik HNADU*. № 79. 84-86 [in Russian].
 4. Zolotaryov V.A., Maliar V.V., Lapchenko A.S. (2011). The effect of SBS polymer content on technical, technological, and rheological properties of bitumens and polymer asphalt concretes. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 1-3 June 2011, 164-176.
 5. Maljar V.V., Kondrat'eva I.G., Oksak S.V. (2012). *Metodichni vkazivki do ekonomichnoi chastini diplomnih proektiv z tehnologii virobництва dorozhn'о-budivel'nih materialiv.* Methodical instructions for the economic part of diploma projects on the technology of road construction materials production]. Harkiv: Vidavnistvo HNADU [in Ukrainian].
 6. *Dorozhniy odjag nezhorstkogo tipu* [Non-rigid type of road clothes]. (2004). VBN V.2.3-218-186-2004 from 01st January 2005. Kiev [in Ukrainian].

Маляр Володимир Володимирович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна, телефон +38 067-718-99-41, vladimirmalyar16@gmail.com

Determination of the economic efficiency of using asphalt polymer concrete with a high content of polymer

Volodymyr Maliar, Associate Professor, Ph.D. (Eng.), Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract. The issue of choosing the most effective method of asphalt concrete modification is relevant because the cost of asphalt concrete mixtures obtained in different ways will be significantly different.

Furthermore, the required physicochemical properties of asphalt concrete and its durability must be taken into account. The goal of the work was to calculate the techno-economic efficiency of using different amounts of polymer modifier in response to changing the elastic properties of asphalt polymer concrete in road pavement structure design. The calculation of the techno-economic efficiency of using asphalt polymer concrete mixture with the use of SBS polymer was carried out by the modified reduced cost method of Prof. V.A. Verenko with the addition of road pavement calculations. On the basis of calculations of techno-economic efficiency of using modifiers, it was determined that the rising costs of such mixtures doesn't compensate for an increase of pavement service life. However, due to the possibility of layer thickness reduction, the use of asphalt concrete mixture with 5% polymer modifier is economically feasible. The scientific novelty of the work is that the method proposes to consider the cost of asphalt concrete in the top layer according to its thickness instead of the cost of asphalt concrete mixture. Such method is based on the analysis of the influence of bitumen polymer modifier content on the features of road pavement structure. In the asphalt concrete production, the use of polymer modifier in the amount of 5% of bitumen mass leads to improvement of physical-mechanical properties, to increased durability of this material and reduced layer thickness of road pavement by 28 %, that is, to resource economy.

Key words: asphalt concrete, polymer modifier, road pavement structure, economic efficiency.

Определение экономической эффективности использования асфальтополимербетон с высоким содержанием полимеров **Маляр В.В., ХНАДУ**

Аннотация. На основе расчетов технико-экономической эффективности использования полимерного модификатора СБС установлено, что подорожание таких смесей не окупается увеличением сроков службы покрытия. Но за счет возможности уменьшения толщины слоя покрытия, использование асфальтобетонной смеси с 5% полимерного модификатора экономически целесообразно.

Ключевые слова: асфальтобетон, полимерный модификатор, конструкция дорожной одежды, экономическая эффективность.