

УДК 625.7 : 625.84

- © І.П. Гамеляк, докт. техн. наук, професор,
- © А.М. Дмитриченко, канд. техн. наук (НТУ)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ЦЕМЕНТОБЕТОНУ ДЛЯ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

Анотація. Запропоновано математичну модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для будівництва дорожніх та аеродромних покриттів. Розроблена математична модель дозволяє визначити ефективність використання високоміцного бетону залежно від його складу та властивостей.

При використанні комплексної добавки економія спостерігається для всіх класів міцності бетону. При новому будівництві необхідно віддавати перевагу покриттям з високоміцного бетону (В 40 – В 60 і вище). Очікуваний економічний ефект при будівництві сучасних цементобетонних покриттів (вартість влаштування 1 м² покриття, грн) при заміні бетону класу міцності на розтяг при згині $B_{btb} 4,0$ на $B_{btb} 5,2$ становить 65,73 грн/м² або майже 14 % для аеродромних покриттів та 49,98 грн/м² або 15,1 % для дорожніх покриттів.

Результати статті можуть застосовуватись для обґрунтування стратегії будівництва сучасних дорожніх та аеродромних покриттів жорсткого типу.

Ключові слова: автомобільна дорога, цементобетон, міцність бетону, вартість, проектування складу цементобетону.

Аннотация. Предложена математическая модель оценки эффективности использования высокопрочного цементобетона для строительства дорожных и аэродромных покрытий. Разработанная математическая модель позволяет определить эффективность использования высокопрочного бетона в зависимости от его состава и свойств.

При использовании комплексной добавки экономия наблюдается для всех классов прочности бетона. При новом строительстве необходимо отдавать предпочтение покрытиям из высокопрочного бетона (В40 – В60 и выше). Ожидаемый экономический эффект при строительстве современных цементобетонных покрытий (стоимость устройства 1 м² покрытия, грн) при замене бетона класса прочности на растяжение при изгибе $B_{btb} 4,0$ на $B_{btb} 5,2$ составляет 65,73 грн/м² или почти 14 % для аэродромных покрытий и 49,98 грн/м² или 15,1 % для дорожных покрытий.

Результаты статьи могут применяться для обоснования стратегии строительства современных дорожных и аэродромных покрытий жесткого типа.

Ключевые слова: автомобильная дорога, цементобетон, прочность бетона, стоимость, проектирование состава цементобетона.

Annotation. In the article the mathematical model of evaluating the effectiveness of high cement-concrete for construction of road and airport paving. The mathematical model is to determine the effectiveness of the use of high-strength concrete, depending on its composition and properties.

When using complex additive savings observed for all classes of concrete strength. In new construction should prefer coated high-strength concrete (B40 – B60 and above). The expected economic effect in the construction of modern cement coatings (placement price of 1m² coating, UAH) When replacing concrete class tensile strength in bending $B_{btb} 4,0$ to $B_{btb} 5,2$ is 65,73 UAH/m² or about 14% to airport coatings and 49,98 UAH/m² or 15.1% for road surfaces.

The results of the article can be used to justify the strategy of building modern road and airport paving rigid type.

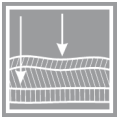
Keywords: road, cement-concrete, concrete strength, cost, design composition cement-concrete.

Вступ

У розвинутих країнах світу від 3 % до 6 % дорожньої мережі мають бетонне покриття. Поширюючи цю статистику для нашої країни отримаємо, що близько 10 000 км доріг України повинні мати цементобетонне покриття. Зокрема це стосується магістральних автомобільних доріг та швидкісних доріг для руху великовантажних транспортних засобів, де висока міцність поверхні дуже важлива. Розвиток стратегії будівництва бетонних покриттів є вимогою часу і пов'язаний з дефіцитом імпортованого бітуму, його дороговизною, вичерпуванням ресурсу міцності асфальтобетону у зв'язку з неконтрольованим зростанням навантажень на вісь транспортних засобів, значного приросту інтенсивності та вантажонапруженості автомобільного руху вима-

гають будівництва дорожніх одягів підвищеної довговічності, застосування сучасних будівельних матеріалів і нових технологій.

Для підвищення довговічності покриттів найдоцільніше застосовувати високоміцні дорожні бетони, для яких міцність на стиск рівна або вище ніж активність цементу $R_c \geq R_u$, а міцність на розтяг при згині становить $R_u^{\sigma} = (0,85 - 0,95) \cdot R_u^{\mu}$ [1]. При одній і тій же товщині плити застосування високоміцних бетонів дозволить збільшити несучу здатність до 30 % і таким чином підвищити строк служби цементобетонного покриття, а при зменшенні товщини досягти економії матеріально-технічних ресурсів [1–2]. Однак в середовищі дорожників України поширена думка про недоцільність використання високоміцних цементобетонів



взагалі [3]. Це суперечить міжнародному досвіду та є стримуючим фактором будівництва сучасних доріг із цементобетонним покриттям.

Метою роботи є розробка математичної моделі для оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких дорожніх та аеродромних покриттів.

Основна частина

Загальна математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких дорожніх та аеродромних покриттів, повинна враховувати вартість вихідних матеріалів для приготування бетонної суміші, витрати та затрати на приготування суміші, навантажувальні – розвантажувальні операції та доставку суміші на будівельну ділянку та основні витрати на влаштування цементобетонного покриття (укладання арматури, розрівнювання, ущільнення, вирівнювання поверхні покриття, нарізку швів та догляд за бетоном тощо). Розрахунок повинен враховувати фактичну міцність бетону (проектування складу) від якої залежить товщина бетонного покриття (проектування конструкції жорсткого дорожнього чи аеродромного одягу). На теперішній час відомо ряд методів підбору складу бетону:

- розрахунок за граничними кривими оптимального складу [4];
- розрахунок за експериментально-теоретичним методом [1, 3, 5].

Розрахунок складу цементобетону в нормах багатьох країн (Німеччини, Польщі тощо) [4] виконують у вигляді граничних кривих, вмісту часток матеріалів менше даного розміру (рис. 1).

При проектуванні складу спочатку визначають частковий вміст кожного з матеріалів на стандартних ситах q_j^{di} , де j – це компонент суміші, а d_i – діаметр отворів сита, на якому визначають часткові залишки.

Потім встановлюють співвідношення між долями компонентів суміші S_1, S_2, \dots, S_n , де n – кількість складових суміші, таким чином, щоб у сумі була плавна крива, яка не виходить за межі граничних кривих норм. Отже, позначивши O_j^{di} – процент часток менше даного розміру на ситах діаметром d_i , а O_{max}^{di} та O_{min}^{di} відповідно максимальні та мінімальні значення процентного вмісту часток на ситах за нормами задачу можна записати у вигляді системи нерівностей:

$$\begin{cases} O_{min}^{40} \leq O_1^{40} \cdot S_1 + O_2^{40} \cdot S_2 + \dots + O_i^{40} \cdot S_i + \dots + O_n^{40} \cdot S_n \leq O_{max}^{40}, \\ \dots \\ O_{min}^5 \leq O_1^5 \cdot S_1 + O_2^5 \cdot S_2 + \dots + O_i^5 \cdot S_i + \dots + O_n^5 \cdot S_n \leq O_{max}^5, \\ \dots \\ O_{min}^d \leq O_1^d \cdot S_1 + O_2^d \cdot S_2 + \dots + O_i^d \cdot S_i + \dots + O_n^d \cdot S_n \leq O_{max}^d, \\ \dots \\ O_{max}^{<0,71} \leq O_1^{<0,71} \cdot S_1 + O_2^{<0,71} \cdot S_2 + \dots + O_i^{<0,71} \cdot S_i + \dots + O_n^{<0,71} \cdot S_n \leq O_{max}^{<0,71} \\ \dots \end{cases} \quad (1)$$

Враховуючи, що у нормах загальна кількість фракцій складає n , маємо систему з n нерівностей. Розбиваємо кожен з виразів у вигляді нерівностей на два і переписуємо у стандартному вигляді. Таким чином, загалом маємо $2 \cdot n$ нерівностей, де n може змінюватися від 7 до 12. Вводячи нові (“додаткові”) невід’ємні змінні і позначивши ліві частини нерівностей 1, 2, ... n відповідно y_1, y_2, \dots, y_n зведемо умови нерівності (1) до задачі лінійного програмування з умовами-рівностями [6] вигляду:

$$y_m = \sum_{i=1}^n O_i^{di} S_i - O_{min}^{di}; \quad y_{m+1} = \sum_{i=1}^n (-O_i^{di} S_i) + O_{max}^{di} \quad (2)$$

Сумарна доля за масою мінеральних матеріалів у суміші дорівнює 100 %, тобто можна записати обмеження на масову долю компонентів або у долях одиниці:

$$\sum_{i=1}^n S_i = 1, \quad (3)$$

Окрім того необхідні умови невід’ємності вмісту компонентів:

$$S_1 \geq 0; S_2 \geq 0; \dots S_n \geq 0 \text{ або } S_i \geq 0, \text{ де } i = 1, 2, \dots n. \quad (4)$$

Таким чином, задачу оптимізації складу асфальтобетонної суміші можна звести до основної задачі лінійного програмування (ОЗЛП), яка у даному випадку ставиться так: знайти невід’ємні значення змінних $S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_n$, які задовольняють умови-рівності (2) і (3), і перетворюють у мінімум лінійну функцію цілі цих змінних.

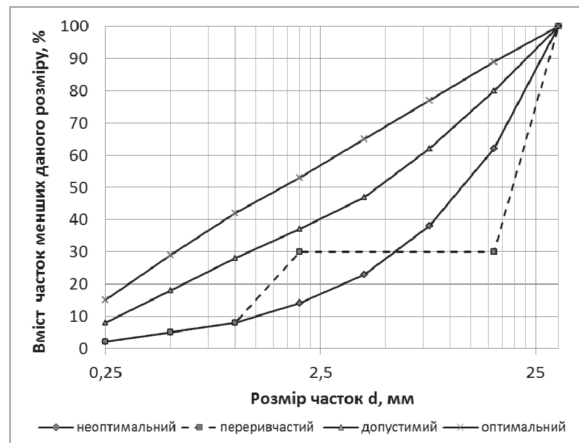
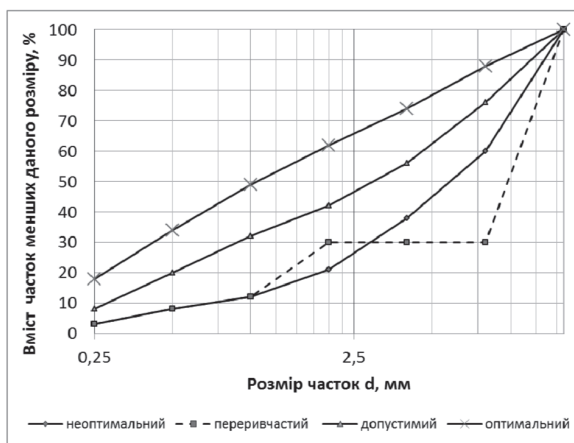
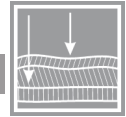


Рис. 1. Криві гранулометричного складу бетонних сумішей



При техніко-економічному обґрунтуванні влаштування цементобетонного покриття функція цілі має вигляд:

$$C_{\text{ЦБП}} = C_{\text{ЦБС}} V_{\text{ЦБС}} + C_{\text{тех}} + C_{\text{пер}} + C_{\text{буд}} + C_{\text{експ}} \Rightarrow \min, \quad (5)$$

При оптимізації складу цементобетону:

$$C_{\text{ЦБС}} = C_{\text{щ}} V_{\text{щ}} + C_{\text{п}} V_{\text{п}} + C_{\text{вс}} V_{\text{вс}} + C_{\text{ц}} V_{\text{ц}} + C_{\text{д}} V_{\text{д}} + C_{\text{в}} V_{\text{в}} \Rightarrow \min, \quad (6)$$

де $C_{\text{ЦБС}}$ – вартість 1 м³ цементобетонної суміші, грн;
 $C_{\text{щ}}, C_{\text{п}}, C_{\text{вс}}, C_{\text{ц}}, C_{\text{д}}, C_{\text{в}}$ – питома вартість франко-приобрітний склад щебеню, піску, відсіву, цементу, добавок і води, грн/м³;

$V_{\text{щ}}, V_{\text{п}}, V_{\text{вс}}, V_{\text{ц}}, V_{\text{д}}, V_{\text{в}}$ – кількість щебеню, піску, відсіву, цементу, добавок та води, яка необхідна для приготування 1 м³ цементобетону, м³;

$C_{\text{тех}}$ – вартість технології приготування цементобетонної суміші (загальнопромислові та адміністративні витрати, амортизація обладнання, прибуток, ПДВ тощо);

$C_{\text{пер}}$ – вартість доставки суміші;

$C_{\text{буд}}$ – вартість технології влаштування цементобетонного покриття (заробітна плата, вартість машин та механізмів тощо).

Враховуючи зв'язок між об'ємом складових і щільністю функцію цілі можна записати у такому вигляді

$$C = \frac{\rho_{\text{сб}}}{100} \cdot \left(C_{\text{щ}} \frac{Q_{\text{щ}}}{\rho_{\text{щ}}} + C_{\text{п}} \frac{Q_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} + C_{\text{вс}} \frac{Q_{\text{вс}}}{\rho_{\text{вс}}} + C_{\text{ц}} \frac{Q_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + C_{\text{д}} \frac{Q_{\text{д}}}{\rho_{\text{д}}} \right) + C_{\text{тех}} + C_{\text{пер}} \Rightarrow \min, \quad (7)$$

де $Q_{\text{щ}}, Q_{\text{п}}, Q_{\text{вс}}, Q_{\text{ц}}, Q_{\text{д}}, Q_{\text{в}}$ – вміст компонентів (щебеню, піску, відсіву, цементу, води та добавок), % за масою;

$\rho_{\text{сб}}$ – середня щільність цементобетону, т/м³;

$\rho_{\text{щ}}, \rho_{\text{п}}, \rho_{\text{вс}}, \rho_{\text{ц}}$ – насипна щільність компонентів, т/м³.

Зміна відносного тарифу на доставку товарного бетону та розчинів апроксимується лінійною залежністю виду:

$$C_{\text{пер}} = T_0 + k \cdot L, \quad (8)$$

де T_0 – постійна;

Таблиця 1

Розрахункові формули для проектування складу цементобетону на стиск та згин

Формула R_6	Визначення коефіцієнтів на стиск (згин)	Автори
При стиску		
$R_6 = AR_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} + K \right)$	При В/Ц від 0,4 до 0,7, Ц/В = 2,50...1,43; При високо якісних матеріалах $A = 0,65$; рядових $A = 0,50$; пониженій якості $A = 0,55$; $K = -0,50$. При В/Ц < 0,4, Ц/В > 2,5 При високо якісних матеріалах $A = 0,43$; рядових $A = 0,40$; пониженій якості $A = 0,37$; $K = 0,50$.	Скрамптаєв Б.Г [5]
$R_6 = AR_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,25 \right)$	де $A = 0,55$ – для крупних пісків з відсівів дроблення, $A = 0,50$ – для крупних природних пісків, $A = 0,45$ – для середніх пісків з модулем крупності більше 2,2, $A = 0,40$ – для середніх пісків з модулем крупності 2,2 і менше, $A = 0,35...0,30$ – для мілких пісків	Шейнін А.М. [2]
$R_6 = A_1 A_2 A_3 \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - K \right) R_{\text{ц}}$	При Ц/В < 1,65, $A_{\text{зст}} = 0,60$ та $K_{\text{ст}} = 0,50$. При Ц/В > 1,65, $A_{\text{зст}} = 0,60$, $K_{\text{ст}} = -0,50$. При стиску $A_1 = 1,00...1,13$. При стиску $A_2 = 0,95...1,05$.	Грушко І.М. [1]
При згині		
$R_6 = 0,34R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,1 \right)$	$A = 0,34$; $K = -0,10$ з об'ємом залученого повітря 5...6 %.	Шейнін А.М. [2]
$R_6 = 0,39R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,1 \right)$	$A = 0,39$; $K = -0,10$ без залученого повітря.	
$R_6 = 0,39R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,1 \right) \times$ $\times (1 - 0,025V_{\text{в}})$	$A = 0,39$; $K = -0,20$; $V_{\text{в}}$ – залучення повітря %.	
$R_6 = 0,38R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,1 \right)$	Для мало щебеневого бетону.	
$R_6 = AR_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - K \right)$	При високо якісних матеріалах $A = 0,42$; рядових $A = 0,40$. При пониженій якості $A = 0,37$; $K = -0,20$.	Скрамптаєв Б.Г [5]
$R_6 = A_1 A_2 A_3 \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - K \right) R_{\text{ц}}$	При Ц/В < 1,65, $A_{\text{зст}} = 0,42$ та $K_{\text{зт}} = 0,30$. При Ц/В > 1,65, $A_{\text{зст}} = 0,42$, $K_{\text{зт}} = -0,50$. $A_1 = 1,00...1,22$; $A_2 = 0,95...1,10$.	Грушко І.М. [1]

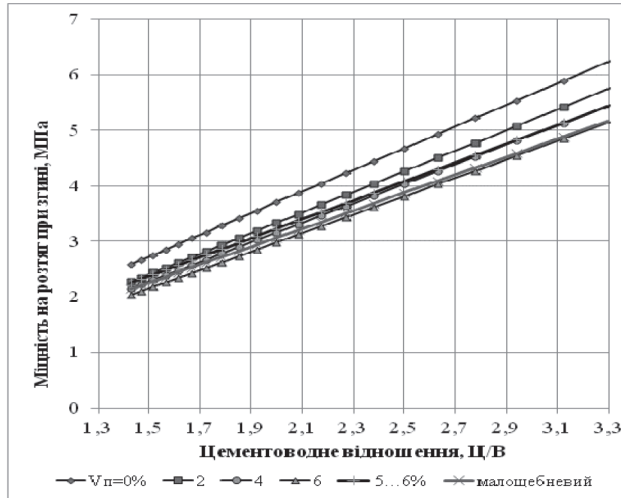
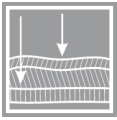


Рис. 2. Аналіз зміни міцності дорожнього цементобетону на розтяг при згині від вмісту повітря за формулами Шейніна А.М.

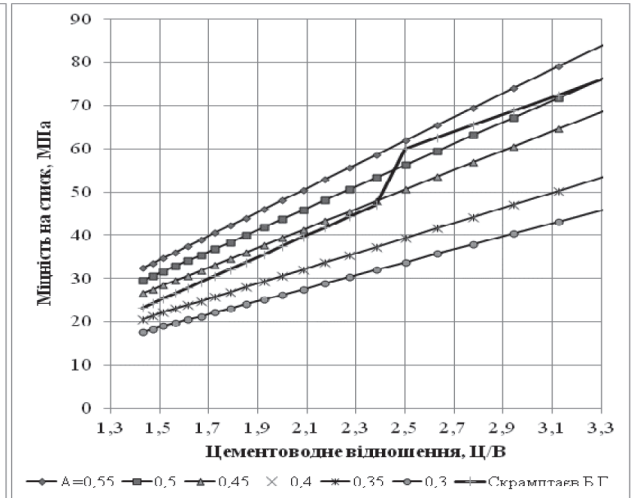


Рис. 3. Аналіз зміни міцності цементобетону на стиск від якості заповнювачів за даними різних авторів

k – змінна величина у вартості перевезення 1 м^3 бетонних сумішей, рівні відповідно 65,600 та 2,4611 для автобетонозмішувачів на відстань їздки L та 183,120 і 9,7621 для самоскидів ЗиЛ за 1 рейс.

Ці коефіцієнти залежать від зарплати водія, вартості паливо-мастильних матеріалів, амортизації, технічного обслуговування тощо.

Формули (1)–(8) є теоретичною моделлю проектування складу бетонної суміші мінімальної вартості за методом граничних кривих.

При розрахунку за загальноприйнятими нормами [7], враховуючи у наведених вище формулах (6), (7) залежності для проектування складу бетону отримується математична модель, для встановлення ефективності використання високоміцного бетону, яка зв'язує склад бетону із його вартістю:

$$C_{сбб} = \frac{1000}{V_{пущ} \cdot \frac{\alpha}{\rho_{н.ст}} + \frac{1}{\rho_{ст}}} \cdot C_{щ} + \left[1 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} \right) \cdot \rho_{р} \cdot C_{п} + В \cdot \frac{Ц}{В} \cdot C_{ц} + D_g \cdot C_{вг} + В \cdot C_{в} \right] \cdot \rho_{ст} \quad (9)$$

де

$V_{пущ}$ – пористість щебеню; $V_{пущ} = 1 - \frac{\rho_{н.ст}}{\rho_{ст}}$;

коефіцієнт розсунення зерен α визначають за апроксимуючою формулою:

$$\alpha = -(0,000011 \cdot V_{ст}^2) + (0,008229 \cdot V_{ст}) - 0,044359 \quad (10)$$

де $V_{ст}$ – абсолютний об'єм цементного тіста.

де цементоводне відношення $\frac{Ц}{В} = \frac{R_{\delta}}{A \cdot R_{ц}} + K$

A і K – коефіцієнти, що залежать від якості матеріалів та способу розрахунку;

R_{δ} – залежність міцності бетону на стиск або згин $R_{\delta} = AR_{ц} \left(\frac{Ц}{В} + K \right)$, де коефіцієнти A і K визначають згідно з табл. 1.

Для розв'язання системи рівнянь (2) – (10) можна використати любий із відомих способів [8, 9].

Запропонована методика реалізована у блоці оптимізації програми ВЕТОН [10], яка написана на мові ПАСКАЛЬ 6.0. Також створена програма ОРТИМА, написана в системі EXEL 7.0 і дозволяє виконувати оптимізацію асфальтобетону на сучасних апаратних засобах [11].

Вартість будівництва цементобетонного покриття $C_{тех}$ визначають згідно розцінок на виконання будівельних робіт в залежності від товщини покриття, згідно норм [12] для дорожніх та [13] для аеродромних покриттів.

Для розрахунку товщини бетонної плити від сумарної інтенсивності руху в системі MathCad задача зводиться до розв'язання такого трансцендентного рівняння:

$$h - \frac{P_k \cdot K_{мц} \cdot K_M \cdot 60 \cdot K_{ум} \cdot K_{шт} \cdot \left[0,0592 - 0,09284 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{P_k / (0,1\pi p)}}{h \cdot \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu_0^2)}{6 \cdot E_0^c \cdot (1 - \mu^2)}}} \right) \right]}{K_f \cdot [B_{fb} \cdot K_{mm} \cdot (1,08 \cdot N_{\Sigma}^{-0,063})]} = 0 \quad (11)$$

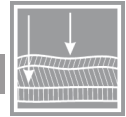
де P_k – розрахункове навантаження на колесо, кН; $K_{мц}$ – коефіцієнт запасу міцності, що визначається залежно від категорії дороги та рівня надійності;

K_M – коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження;

$K_{ум}$ – коефіцієнт, що враховує умови роботи;

$K_{шт}$ – коефіцієнт, що враховує вплив з'єднань із штирями;

p – тиск у шинах, МПа;



Таблиця 2

Результати розрахунків вартості будівництва 1 м² дорожнього та аеродромного покриття при використанні високоміцних бетонів

Клас бетону за міцністю, МПа		Вартість бетону П0 (осадка конуса 1 – 4 см) 1 м ³ бетону, грн, на 01.02.2015		Товщина плити покриття, см, машинна укладка Wirtgen. Вартість влаштування 1 м ² покриття, грн			
на стиск В	на розтяг при згині, В _{btb}	з ПДВ	без ПДВ	Дорожнього		Аеродромного	
В 20	2,8	812,50	677,08	44,0	439,73	60,0	599,32
В 25	3,2	860,16	716,80	38,0	398,18	52,0	544,56
В 27,5	3,6	885,02	737,52	33,0	354,19	47,0	504,09
В 30	4,0	910,61	758,84	30,0	329,82	43,0	472,37
В 35	4,4	964,02	803,35	26,0	299,99	39,0	449,55
В 40	4,8	1020,57	850,48	24,0	290,69	35,0	423,52
В 45	5,2	1080,43	900,36	22,0	279,84	32,0	406,64
В 50	5,6	1143,80	953,17	20,0	267,28	28,0	373,84
В 55	6,0	1210,89	1009,08	19,0	266,83	26,0	364,82
В 60	6,4	1281,92	1068,27	17,5	258,39	24,0	354,04

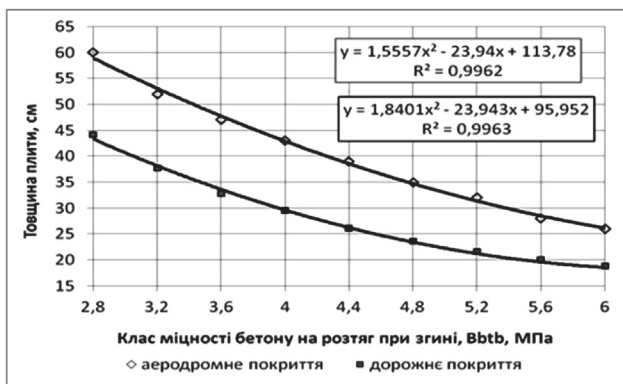


Рис. 4. Порівняння результатів розрахунку товщини бетонної плити верхнього шару дорожнього та аеродромного покриття залежно від класу міцності бетону

E і μ – модуль пружності, МПа і коефіцієнт Пуассона бетону;
 μ_0 – коефіцієнт Пуассона основи;
 E_{0e} – еквівалентний модуль пружності основи, МПа;
 B_{tb} – мінімальний проектний клас бетону за міцністю на розтягування при згині, МПа;
 K_{nm} – коефіцієнт набору міцності;
 N_{Σ} – сумарна кількість проїздів розрахункових осей за строк служби дорожнього одягу (осей/строк служби);
 K_t – коефіцієнт, що враховує вплив температурного короблення плит, апроксимується параболою другого порядку для різних дорожньо-кліматичних зон:

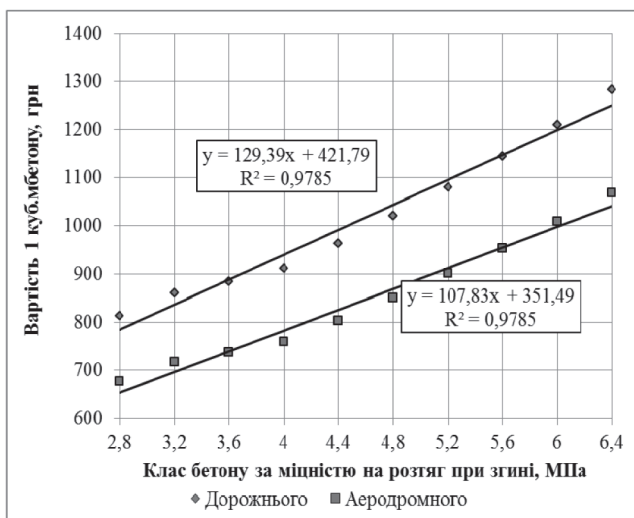


Рис. 5. Зміна ціни 1 м³ важкого та високоміцного бетону залежно від класу міцності на розтяг при згині

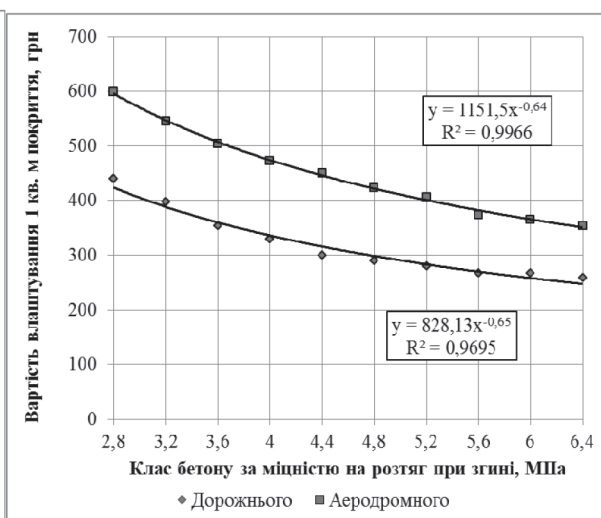
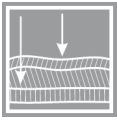


Рис. 6. Результати розрахунку вартості 1 м² бетонного покриття залежно від класу міцності на розтяг при згині



$$K_i(h) = a + b \cdot h + c \cdot h^2. \quad (12)$$

Наприклад, для дорожньо-кліматичної зони У-І $a = 1,134923$; $b = -0,001566$; $c = -0,000629$.

Розв'язання задачі наведено в роботі [2].

Кошторисна вартість будівництва розрахована за програмою СМЕТА.

Розглянемо конкретний приклад застосування наведеної методики.

Варіант конструкція жорсткого дорожнього одягу:

1. Монолітний дорожній цементобетон класу міцності на стиск В 35, на розтяг при згині $V_{tb} = 4,4$ та морозостійкості $F = 200$ згідно з ДСТУ Б.В.2.7-43 товщиною від $h = 0,15 - 0,26$ м.

2. Розділяючий прошарок із геосинтетичного матеріалу щільністю 500 г/м^2 .

3. Пісний бетон В 7,5 згідно з ДСТУ Б.В.2.7-43 – $h = 0,16$ м.

4. Грунтоцемент М 40, влаштований змішуванням в установці з витратою цементу М 400 – 12 %, згідно з ДСТУ Б.В.2.7-207 – $h = 0,20$ м.

Грунт земляного полотна – суглинок важкий пилуватий.

Варіант конструкція жорсткого аеродромного покриття:

1. Монолітний цементобетон $V_{tb} 4,4/55$ В 40 $F > 150$ ГОСТ 26633, $E_{b, sup} = 3,53 \cdot 10^4$ МПа, $t_{sup} = 0,40$ м.

2. Розділяючий прошарок із геотекстилю.

3. Цементобетон $V_{tb} 2,8/35$ В 20, $F > 150$ ГОСТ 26633, $E_{b, inf} = 2,6 \cdot 10^4$ МПа, $t_{inf} = 0,30$ м.

4. Грунтоцемент М 75 із оптимальної суміші ГОСТ 23558, $E_{f1} = 60 \cdot 10^2 \cdot 1,3 = 78 \cdot 10^2$ МПа, $t_{f1} = 0,25$ м.

Розрахунковий еквівалентний коефіцієнт постелі основи $K_{se} = 80,52 \text{ МН/м}^3$.

5. Технологічний шар з ГПС, $E_{f2} = 2,8 \cdot 10^2$ МПа, $t_{f2} = 0,15$ м.

6. Жорстка армуюча геогратка.

7. Захисний (технологічний) шар із піску, $E_{f4} = 1,2 \cdot 10^2$ МПа, $t_{f4} = 0,25$ м.

8. Геосинтетичний гідроізоляційний прошарок.

9. Вирівнюючий шар із піску $E_{f5} = 100$ МПа, $t_{f5} = 0,15$ м.

10. Ущільнена природна ґрунтова основа з еквівалентним коефіцієнтом постелі $K_{se} = 35 \text{ МН/м}^3$.

За результатами розрахунків (рис. 4, табл. 2) встановлено вартість будівництва $1,0 \text{ м}^2$ дорожнього одягу (автомобільна дорога 1-ої категорії) та аеродромного покриття (першого класу) при використанні високоміцних бетонів при наведених вище вихідних даних.

Вартість перевезення при дальності доставки автосамоскидами 30 км становить $139,08 \text{ грн} / 1 \text{ м}^3$ бетону.

Висновки

В умовах інтенсивного руху з великими швидкостями і різким гальмуванням важких автомобілів, автобусів і тролейбусів, з метою забезпечення високих експлуатаційних якостей покриттів, виникає потреба у збільшенні будівництва доріг із цементобетонним

покриттям. Розроблена математична модель дозволяє визначити ефективність використання високоміцного бетону залежно від його складу та властивостей.

При використанні комплексної добавки економія спостерігається для всіх класів міцності бетону. При новому будівництві необхідно віддавати перевагу покриттям із високоміцного бетону (В 40 – В 60 і вище). Очікуваний економічний ефект при будівництві цементобетонних покриттів сучасних аеродромів, де товщина плити $40 - 45 \text{ см}$ (вартість влаштування 1 м^2 покриття, грн) при заміні бетону класу міцності на розтяг при згині $V_{tb} 4,0$ на $V_{tb} 5,2$ становить $(472,37 - 406,64) = 65,73 \text{ грн/м}^2$ або майже 14 % для аеродромних покриттів та $(329,82 - 279,84) = 49,98 \text{ грн/м}^2$ або 15,1 % для дорожніх покриттів.

Розцінки на влаштування цементобетонного покриття для сучасних комплектів машин відсутні і потребують додаткового уточнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожніх і аеродромних покриттів. – М.: Транспорт, 1991. – 151 с.
2. Гамеляк І.П. Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів // Автомоб. дороги і дорожнє буд-во. – 2012. – № 85. – С. 45–54.
3. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. – Харьков: Вища школа, изд-во Харьковського ун-та, 1986. – 156 с.
4. DIN 1045-1:2008-08. Concrete, Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Structures. – Part 1: Design and Construction. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2008.
5. Основин В.Н. Справочник по строительным материалам и изделиям / В.Н. Основин, Л.В. Шуляков, Д.С. Дубяго. – Изд. 4-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 443 с.
6. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
7. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава.
8. Банди Б. Основы линейного программирования: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
9. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
10. Гамеляк І.П. Програма расчета состава цементобетона // Информ листок № 016-97. КиевЦНТЭИ. – 1997. – 3 с.
11. Гамеляк І.П. Оптимізація складу зернистих сумішей методами лінійного програмування // Зб. наук. пр. Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку. – К., 1998. – С. 205–208.
12. ВБН В.2.3.-218-008-97. Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. – К.: Укравтодор, 1997. – 218 с.
13. СНиП 2.05.08-85. Аеродроми. – М: ЦИТП Госстроя СРСР, 1985. – 59 с.