

ТЕХНОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ ПРИ ВЛАШТУВАННІ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРІВ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF ASPHALT CONCRETE LAYERS OF ROAD CLOTHING



Гамеляк Ігор Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри аеропортів, Національний транспортний університет, 01010, Україна, Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, оф. 344, ел. пошта: gip65n@gmail.com, тел. +380503524124,

<https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>.



Коваль Тетяна Ігорівна, інженер проектувальник відділу мостів ТОВ «Інжинірингова компанія «Автомагістраль», e-mail: tetianakoval412@gmail.com, тел. +380969344303

<https://orcid.org/0000-0001-7063-6512>

Анотація. Об'єкт дослідження – неоднорідність при влаштуванні асфальтобетонних шарів дорожнього одягу.

Мета роботи полягає в розробці методу оцінки технологічної надійності влаштування асфальтобетонного покриття з врахуванням неоднорідності факторів впливу.

Метод дослідження – збір даних технологічних параметрів при влаштуванні асфальтобетонних шарів та статистичний аналіз даних.

Для вирішення поставленої мети запропоновано математичну модель влаштування асфальтобетонного покриття з врахуванням стохастичного характеру процесу будівництва.

У статті проведений аналіз однорідності бітуму, зернового складу сумішей та властивостей асфальтобетону, що вказує на необхідність уточнення нормативних показників з урахуванням реальних середніх значень та неоднорідності при розробці технічних умов.

Для встановлення неоднорідності несної здатності (міцності та жорсткості) отримано дані безпосередніх спостережень та експериментальних вимірювань параметрів технологічного процесу, зміни складу та властивостей матеріалів шарів дорожнього одягу, які визначалися в процесі приготування сумішей та влаштування шарів.

Наведені формули дозволяють враховувати якість будівництва безпосередньо при розрахунку конструкції дорожнього одягу і прогнозуванні її строку служби.

Результати статті повинні використовуватися у подальшому при влаштуванні дорожніх одягів із асфальтобетонних шарів та аналізі їх надійності.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – збільшення надійності конструкцій дорожнього одягу та зменшення коефіцієнтів запасу при врахуванні реальної неоднорідності та контролю якості влаштування асфальтобетонних покриттів.

Ключові слова: асфальтобетонні шари, надійність, коефіцієнт варіації, технологія влаштування.

Вступ. Процес будівництва автодороги підлягає впливу багатьох факторів (кліматичних, організаційних, технічних, соціальних), більша частина яких носить випадковий характер. Тому якість будівництва має імовірнісний характер. В той же час якість процесу будівництва – основний фактор, що визначає довговічність та надійність покриття при дії транспортних навантажень і факторів впливу навколишнього середовища.

Аналіз публікацій. Для покращення процесу будівництва останніми роками закордоном були впроваджені технології контролю якості/гарантії якості (QC/QA) та заохочувальні виплати. Розроблено кількісні методи для встановлення штрафів або премій за стадію будівництва асфальтобетонного покриття при будівництві нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг [1 - 6].

У цих методах моделювання та випадковий вибір змінних приймається за нормальним розподілом випадкових змінних з відомими або прийнятими середніми значеннями і їх варіацією. Окремі значення можуть бути змінними у відповідності з розкидом, що очікується при нормальному процесі будівництва.

Постановка проблеми. Базуючись на основних положеннях класичної теорії надійності [7 - 9],

випадкові процеси зміни несучої здатності (міцності та жорсткості) та навантаження (напруження) представляються у виді системи випадкових величин. Після введення фактору часу надійності H (ймовірність безвідмовної роботи P виконання умов роботоздатності z_i) КДО набуває вигляду:

$$H(N(t)) = P\{Z_i = R_i(x_1(N(t))) - Q_i(x_2(N(t))) > 0\}, i = 1, k_{\phi} \text{ або} \quad (1)$$

де $R_i(x_1(N(t)))$, $Q_i(x_2(N(t)))$ – функції несучої здатності й навантаження від векторів початкових факторів $x_1(N(t))$ та $x_2(N(t))$; k_{ϕ} – кількість функцій роботоздатності або критеріїв граничного стану, $N(t)$ – сумарна інтенсивність руху в процесі експлуатації в момент часу t .

Для нормального випадкового процесу справедлива залежність

$$H(N(t)) = 0,5 + F(\beta(N(t))) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta(N(t))}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2)$$

де $F(\beta(N(t)))$ – нормована функція Лапласа,

$\square(N(t))$ – характеристика безпеки, що змінюється в процесі експлуатації:

$$\beta(t) = \frac{\mu_R(t) - \mu_Q(t)}{\sqrt{S_R^2(t) + S_Q^2(t)}} \text{ або } \beta(N(t)) = \frac{K_{np}(N(t)) - 1}{\sqrt{C_R^2(N(t)) \cdot K_{np}^2(N(t)) + C_Q^2(N(t))}}, \quad (3)$$

де $\mu_R(N(t))$ – середнє значення міцності; $\mu_Q(N(t))$ – середнє значення напруження; $S_R(N(t))$ і $S_Q(N(t))$ – середньоквадратичні відхилення чи коефіцієнти варіації $C_R(t)$ міцності та $C_Q(N(t))$ напруження відповідно в момент часу, що розглядається.

Коефіцієнт варіації для критеріїв граничного стану визначається за формулою

$$C_{E, \tau, \sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial(E_{заз}, \tau, \sigma)}{\partial \Phi_i} \right)^2 \left(\frac{\overline{\Phi_i}}{\overline{E_{заз}}, \overline{\tau}, \overline{\sigma}} \right)^2 C_{\Phi_i}^2 \right]}, \quad (4)$$

де n – кількість параметрів, які впливають на розрахунок для даного критерію граничного стану; Φ_i та $\overline{\Phi_i}$ – параметр розрахунку та його середнє значення; C_{Φ_i} – коефіцієнт варіації параметру.

Формули 1-4 дозволяють зв'язати загальну надійність конструкції з якістю будівництва і відповідно технологічною надійністю.

Мета роботи полягає в розробці методу оцінки технологічної надійності влаштування асфальтобетонного покриття з врахуванням неоднорідності факторів впливу.

Для вирішення поставленої мети розроблено математичну модель влаштування асфальтобетонного покриття з врахуванням стохастичного характеру процесу будівництва [7 - 9]. Для встановлення неоднорідності несної здатності (міцності та жорсткості) необхідно мати дані безпосередніх спостережень та експериментальних вимірювань параметрів технологічного процесу, зміни складу та властивостей матеріалів шарів дорожнього одягу, які повинні визначатися в процесі приготування сумішей та влаштування шарів.

Технологічна надійність виготовлення ДБМ із заданими властивостями та будівництва КДО встановлюється з використанням: (1) формально-статистичного опису технологічного процесу; (2) теорії масового обслуговування (ТМО); (3) методу статистичних випробувань, як найбільш універсального при недостатній кількості даних, які описують процес; (4) експериментального визначення окремих параметрів технологічного процесу з подальшим описом усього технологічного процесу за допомогою Фур'є аналізу чи теорії випадкових процесів і полів [9].

1. Оцінка неоднорідності властивостей органічних в'язучих

З метою оцінки неоднорідності бітуму методами математичної статистики аналізували дані випробувань виробничої лабораторії Кременчуцького НПЗ. Було оброблено більш як 1600 даних випробувань стандартних властивостей сировини та готового бітуму, що був приготовлений на окислювальній установці. В результаті обробки проведено кореляційний та регресійний аналіз, побудовані гістограми і встановлені статистичні параметри та функції розподілу випадкових величин, що характеризують стандартні властивості сировини: C – в'язкість, T_c – температура розм'якшення гудрону, та бітуму: P – пенетрація, T_6 – температура розм'якшення бітуму, при ходовому та товарному аналізах та ін. Результати аналізу наведено на рис. 1.

Статистичний аналіз результатів випробування бітумів в різних регіонах України виконано з метою визначення закономірностей розподілу основних стандартних показників властивостей дорож-

ніх бітумів. Бітум отримували в результаті окислення на локальних установках безкомпресорним способом при температурі 210 - 240 °С. Постачальник вихідної сировини в основному Кременчугський НПЗ та Уфимський НПЗ. Оброблено дані багаторічних випробувань будівельних лабораторій АБЗ в різних регіонах України за період 15 років. Загальна кількість випробувань перевищує 1100. Як виявилося між температурою розм'якшення $T_{R@B}$ та пенетрацією P_{25} бітуму існує тісний кореляційний зв'язок, що може бути представлено логарифмічною залежністю (рис. 2).

$$T_{R@B} = 937 - 10553 \ln P_{25}, R^2 = 0,975. \quad (6)$$

Отримана залежність близька до даних отриманих в Бельгії і опублікованих в матеріалах VI конгресу Євро бітум [10].

Щільність імовірності розподілу основних показників дорожніх бітумів в більшості випадків в межах одного заводу розподілена нормально. Об'єднувати дані всіх випробувань в одну вибірку недоцільно, так як кожен регіон характеризується своєю найбільш поширеною маркою бітуму.

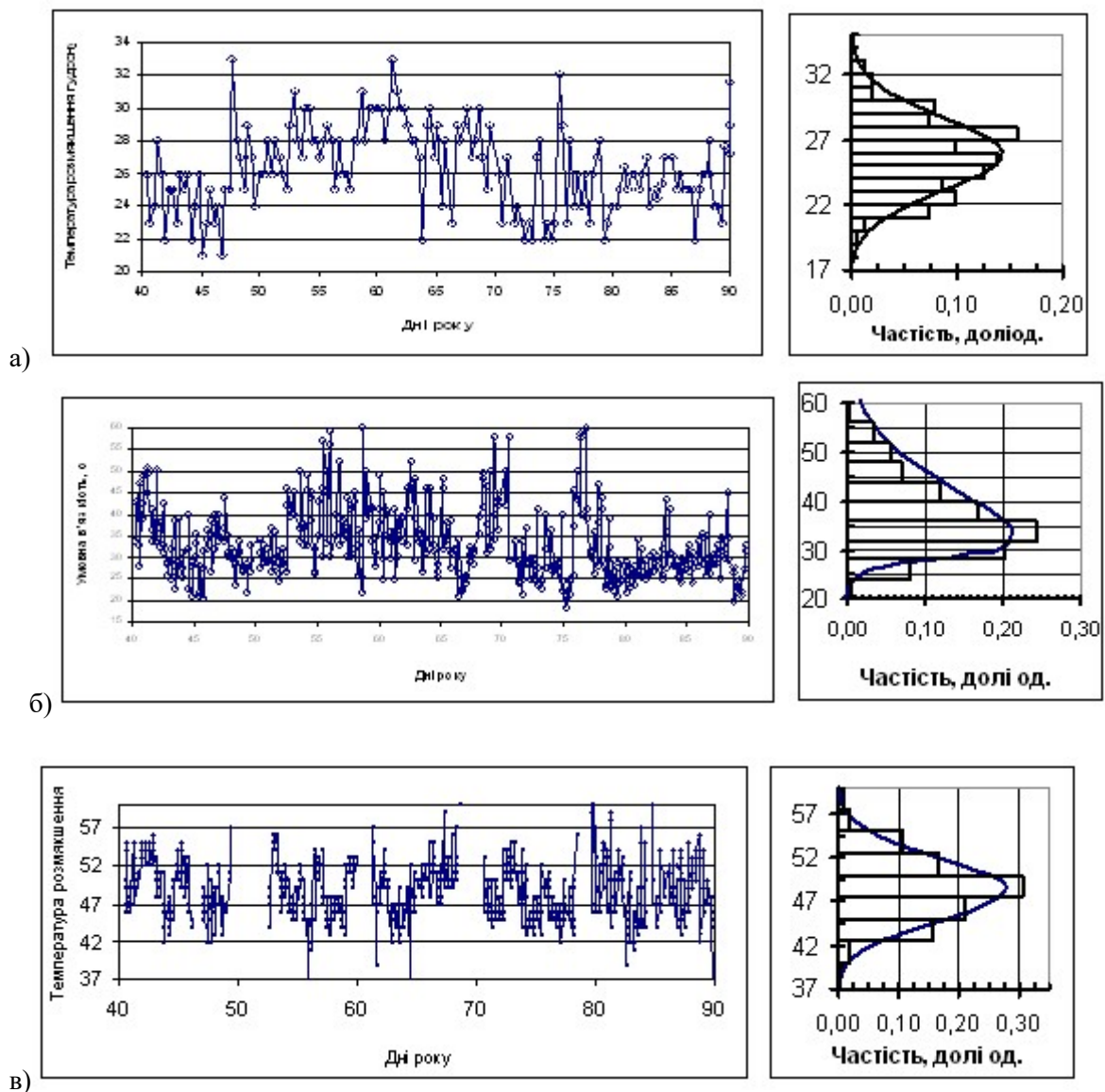


Рисунок 1 – Випадкові процеси зміни властивостей сировини та бітуму на НПЗ для: а) температури розм'якшення; б) умовної в'язкості сировини; в) температури розм'якшення бітуму

Figure 1 – Random processes of changing the raw materials and bitumen properties at refineries for: a) softening temperature; б) conditional viscosity of raw materials; в) bitumen softening temperature

2. Дослідження варіації параметрів технологічного процесу приготування асфальтобетону та влаштування асфальтобетонного покриття

Комплексний технологічний процес будівництва асфальтобетонного покриття складається із таких робочих операцій: приготування асфальтобетонної суміші на АБЗ; доставка з АБЗ до місця роботи гарячої суміші; розвантаження її в бункери асфальтоукладальників; розподіл готової суміші з попереднім ущільненням; ущільнення покриття комплексом ущільнюючої техніки; контрольна перевірка якості та температури суміші, ступеня ущільнення і геометричних розмірів.

Технологічний процес приготування асфальтобетонної суміші досліджувався на асфальтобетонних заводах м. Києва, а процес укладки на конкретних об'єктах дорожнього будівництва за період 1998-2017 рр.

На основі проведених досліджень побудовано гістограми та методи математичної, статичної обробки було встановлено теоретичну щільність розподілу основних параметрів технологічного процесу приготування асфальтобетонної суміші та влаштування асфальтобетонного покриття. Приклад неоднорідності зернового складу на окремих ситах приведено на рис. 3.

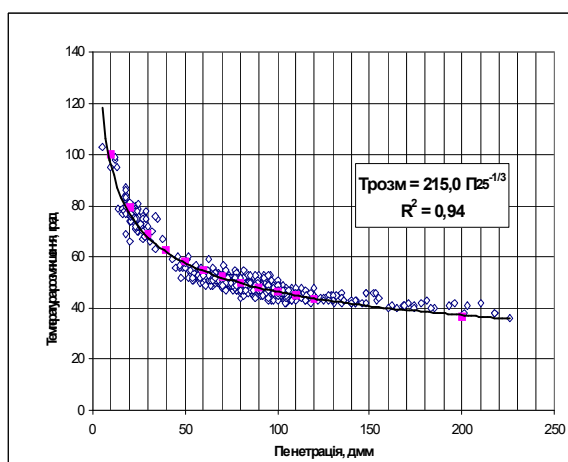


Рисунок 2 – Залежність температури розм'якшення від пенетрації бітумів марок 40/60, 60/90 та 90/130
 Figure 2 – Dependence of softening temperature on penetration of bitumens of grades 40/60, 60/90 and 90/130

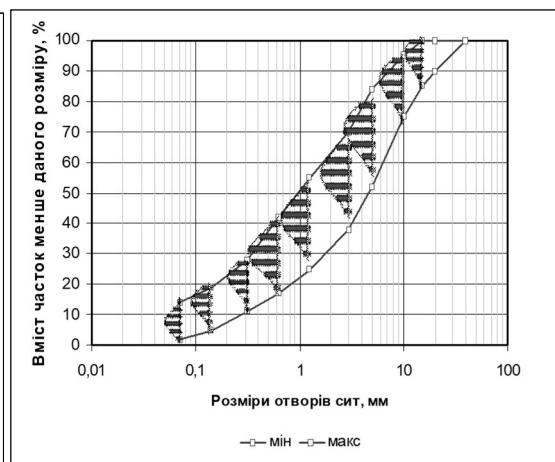


Рисунок 3 – Неоднорідність гранулометричного складу асфальтобетону
 Figure 3 – Heterogeneity of granulometric composition of asphalt concrete

Незважаючи на намагання суворого дотримання технології виконання робіт внаслідок напівавтоматичного режиму приготування суміші на АБЗ, та труднощів організаційного характеру та недосконалої наявної техніки спостерігається значний розкид параметрів технологічного процесу з відхиленнями від рекомендованих стандартом значень температурного режиму укладки і ущільнення асфальтобетону (табл. 1). Експериментальні дані по розподілу температурного режиму влаштування асфальтобетонного покриття описуються нормальним законом (рис. 4).

Таким чином, в процесі влаштування асфальтобетонного шару покриття неоднорідність температурного режиму при традиційній технології збільшується в 3 рази, що в подальшому призводить до варіації показників фізико-механічних характеристик асфальтобетону. Використання повністю термоізованих машин-термосів, в яких кузов механічно-закривається дозволяє значно зменшити варіацію температури (табл. 1).

Обробка даних часу доставки асфальтобетонної суміші на будівельну площадку підтвердила можливість описання експериментальних даних Бета-законом

$$p(\eta, \gamma, t) = \frac{\Gamma(\eta + \gamma)}{\Gamma(\eta)\Gamma(\gamma)} t^{\gamma-1} (1-t)^{\eta-1}, \quad (6)$$

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки параметрів температурного режиму влаштування асфальтобетонного покриття

Table 1 – The results of statistical processing of the parameters of variation temperature of the asphalt pavement

Температура суміші	Середнє значення		Стандарт		Коеф. варіації	
	I	II	I	II	I	II
При випуску на АБЗ	141,1	-	7,4	-	5,2	-
В кузові автомобіля	128,4	156,9	11,6	34,4	9,0	3,7
Укладки в асфальтоукладальнику	126,7	150,1	13,18	40,0	10,4	4,2
Початку ущільнення	117,5	144,2	14,5	61,3	12,3	5,4
Закінчення ущільнення	51,7	-	8,7	-	16,8	-

Примітка: I – перевезення здійснювалося з відкритим кузовом, час доставки 40 – 60 хв. [6]; II – перевезення здійснювалося в повністю термоізованих машинах-термосах (дані інж. Мисіна В.С.)

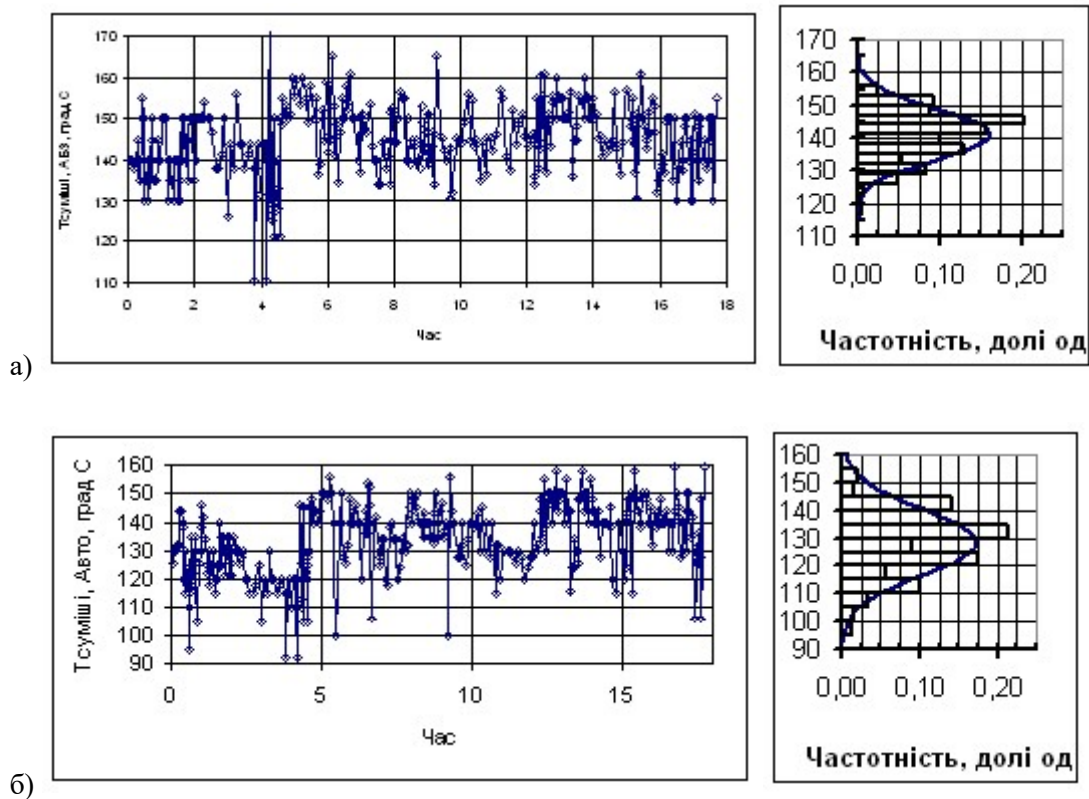


Рисунок 4 – Випадковий процес та його статистичний опис для: а) температури асфальтобетонної суміші при випуску на АБЗ та б) в асфальтоукладальнику

Figure 4 – Random process and its statistical description for: a) temperature of asphalt concrete mix at release on ABZ and b) in asphalt paver

Особливе значення надається процесу ущільнення асфальтобетонної суміші. Цей процес є остаточним етапом формування асфальтобетонного покриття. В результаті ущільнення формується необхідна структура матеріалу, забезпечується міцність і надійність асфальтобетонного покриття.

Оскільки одним з найважливішим параметром забезпечення надійності є визначення однорідності і характеру зміни товщини шару асфальтобетонного покриття, у табл. 2 приведено узагальнення результатів даних досліджень, виконаних в США та СРСР для різного рівня якості будівництва.

Таблиця 2 – Узагальнення даних по визначенню коефіцієнта варіації товщини, C_h
 Table 2 – Generalization of data to determine the coefficient of variation of thickness, C_h

Товщина шару, см	Високий рівень (США)	Коефіцієнт варіації товщини, C_h , %	
		Середній рівень (існуючий)	Низький рівень (СРСР)
5	12,0	20	25,0
10	10	15	20
15	9	12	14
20	8	10	12
25	7,5	9	10,0
30	7,0	8	9,0

Загальна неоднорідність товщини конструкції

$$C_{h\Sigma} = \frac{1}{h_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{h_i} \cdot h_i)^2}, \quad (7)$$

де C_{h_i} - коефіцієнт варіації товщини i – того шару дорожнього одягу, що апроксимується степеневою залежністю

$$C_{h_i} = A \cdot h_i^B, \quad (8)$$

тут параметри, які залежать від матеріалу та технології влаштування шару, (наприклад для асфальтобетону $A = 20$, $B = -0,31$, для матеріалів основи $A = 66,4$, $B = -0,588$); h_i - товщина i - того шару покриття, см; h_{Σ} - сумарна товщина дорожнього одягу, см; n - кількість шарів у конструкції.

Результати дослідження варіації стандартних властивостей асфальтобетону приведені в попередніх роботах [5].

В результаті статистичної обробки виявилось, що теоретичні функції щільності ймовірності більшості параметрів технологічного режиму та властивостей асфальтобетону (температури влаштування покриття, розм'якшення гудрону та бітуму, механічні властивості асфальтобетону та ін.) добре описуються нормальним законом

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

з відповідними параметрами математичного сподівання і дисперсії.

Для параметрів, що мають велику неоднорідність ($C_v > 0,3$) по критерію χ^2 , (в'язкість гудрону, набрякання, водонасичення асфальтобетону) краще підходить закон Вейбула зі змінними параметрами, який може бути представлений у вигляді:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (10)$$

де α - параметр масштабу; β параметр форми. При $\alpha = 1$ закон Вейбула переходить в експоненційний. Як виявилось, розподіл водонасичення та набухання переформованих зразків однаково добре описуються законом Вейбула та експоненційним законом.

Ряд властивостей (в'язкість, коефіцієнт ущільнення) краще описувати законом Пірсона типу I такого виду:

$$\tilde{n}_j = \tilde{n}_0 \left(1 + \frac{x}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 + \frac{x}{l_2}\right)^{q_2}, \quad (11)$$

де q_1, q_2 - показники форми; l_1, l_2 - параметри масштабу; n_0 - частота.

Оцінки розкиду накопичених при контролі якості випуску сумішей що характеризують досягнутий рівень якості зведені в табл. 3.

Проведені дослідження та зауваження проектувальників доріг дозволяють запропонувати методику корегування та забезпечення проектної надійності на етапі будівництва, яка складається з таких етапів.

1) Проектування конструкції дорожнього одягу виконується при середньостатистичних коефіцієнтах варіації геометричних параметрів (ширини та товщини конструктивних шарів), параметрів мі-

цності та деформативності шарів основи і ґрунту земляного полотна (міцності на розтяг при згині монолітних шарів, середнього модуля пружності т.п.).

Таблиця 3 – Розкид значень параметрів після влаштування асфальтобетонного покриття
Table 3 – Variation of values of parameters after the device of an asphalt concrete pavement

Параметр	Значення		Стандарт		Коеф. варіації	
	мін	макс	мін	макс	мін	макс
Вміст бітуму, %	4,5	7,2	0,11	0,3	2,6	4,3
Вміст пор, %	3	10	0,65	1,6	21,7	16,0
Вміст мін. порошку, %	5	16	0,45	1,1	7,0	9,0
Вміст піску, %	24	36	1,65	4	7,0	11,1
Товщина шару, см	5	15	0,5	1,80	10,0	12,0

II) На основі операційного контролю виконання робіт і складання акту прихованих робіт визначаються фактично досягнуті коефіцієнти варіації, з врахуванням яких після влаштування пакету шарів основи проектною організацією в ході авторського нагляду проводиться перерахунок коефіцієнтів запасу міцності шарів покриття і основи.

III) На підставі перерахунку конструкції дорожнього одягу з отриманими коефіцієнтами запасу міцності за критеріями граничного стану проводиться розрахунок нової товщини шарів покриття і узгоджується можливість зниження нижніх шарів покриття без зміни договірної ціни будівництва. При цьому підрядчик повинен узяти на себе певні зобов'язання по збільшенню гарантійного терміну.

IV) У випадках отримання вищих коефіцієнтів варіації і необхідних коефіцієнтів запасу міцності фактична товщина нижніх шарів покриття повинна бути збільшена проти проектною без зміни договірної ціни, за рахунок коштів замовника.

V) Підрядник бере на себе зобов'язання утримувати автомобільну дорогу в визначеному транспортно-експлуатаційному стані протягом встановленого гарантійного терміну служби. Для можливості виправлення дефектів та руйнувань впродовж гарантійного терміну встановлюється стабілізаційний фонд в установленому розмірі. При неякісному виконанні робіт з підрядника стягується штраф у розмірі витрат на майбутні передчасні ремонти з врахуванням майбутньої ціни матеріалів та вартості будівництва. За якісне будівництво, при досягненні міцності та однорідності вище існуючих на сьогоднішній день нормативів та допусків, підряднику виплачується премія в розмірі майбутньої економії на ремонтах покриття.

Висновки

1. Проведений аналіз однорідності бітуму, зернового складу та властивостей асфальтобетону, вказує на необхідність уточнення нормативних показників з врахуванням реальних середніх значень та неоднорідності при розробці технічних умов.

2. Для досягнення нормативних значень загальної однорідності за прийнятими критеріями граничного стану необхідно строго дотримуватися однорідності фізико-механічних характеристик матеріалів шарів дорожнього одягу, розходу матеріалів, геометричних параметрів та технологічних факторів при приготуванні сумішей та влаштуванні покриттів.

3. Наведені формули дозволяють враховувати якість будівництва безпосередньо при розрахунку конструкції дорожнього одягу і прогнозуванні її строку служби.

Перелік посилань

1. Deacon, J. A., C.L. Monismith, and J. T. Harvey. Pay Factors for Asphalt-Concrete Construction: Effect of Construction Quality on Agency Costs. TM-UCB-CAL/APT-97-1. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 47 pp., April 1997.
2. Mensching DJ, Myers McCarthy L, Mehta Y, Byrne M (2013) Modeling flexible pavement overlay performance for use with quality-related specifications. Constr Build Mater 48:1072–1080.
3. NCHRP (2009) Report 626: NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction. Transportation Research Board, Washington D.C.
4. NCHRP (2011) Report 704: A Performance-Related Specification for Hot-Mixed Asphalt. Transportation Research Board, Washington D.C.
5. Praticò F. G., Casciano A. Variability of HMA characteristics and its influence on pay adjustment. // Journal of Civil Engineering and Management. - 2015 Volume 21(1). – P. 119–130.
6. Warsame A (2013) Framework for Quality Improvement of Infrastructure Projects. J Civil Eng Archit 7(12)

(Serial No. 73):1529–1539.

7. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность.- М.: Стройиздат, 1978. — 239с.

8. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 1982. — 351с.

9. Гамеляк І.П. Забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу. Дис. ... д.т.н., Київ. - НТУ, 2008.

10. Радовский Б.С. Автомобильные дороги. Материалы VI - конгресса Евробитум. - 1994.

TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF ASPHALT CONCRETE LAYERS OF ROAD CLOTHING

Gameliak Ihor P., Dr. Tech. Sci., Professor, National Transport University, Head of Airports Department, e-mail: gip65n@gmail.com, тел. +380503524124. <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>

Koval Tetiana I., engineer, designer of the bridges department of LLC «Engineering Company «Highway», e-mail: tetianakoval412@gmail.com, +380969344303. <https://orcid.org/0000-0001-7063-6512>

Abstract. The object of study is the heterogeneity in the arrangement of asphalt concrete layers of road pavement.

The purpose of the work is to develop a method for evaluating the technological reliability of the arrangement of asphalt pavement taking into account the heterogeneity of the factors of influence.

The research method is the collection of technological parameters data in the arrangement of asphalt concrete layers and statistical data analysis.

To solve this goal, a mathematical model of the arrangement of the asphalt pavement with the stochastic nature of the construction process is proposed.

The article analyses the homogeneity of bitumen, grain composition of mixtures and properties of asphalt concrete, which points to the need to clarify the normative indicators, taking into account the real average values and heterogeneity in the development of technical conditions.

To establish the heterogeneity of the bearing capacity (strength and rigidity), the data of direct observations and experimental measurements of process parameters, changes in the composition and properties of materials of layers of road pavement, which were determined in the process of preparation of mixtures and arrangement of layers, were obtained.

These formulas allow to take into account the quality of construction directly when calculating the design of road pavements and forecasting its service life.

The results of the article should be used later in the arrangement of road pavements made of asphalt concrete layers and the analysis of their reliability.

Estimated assumptions for the development of the object of study - to increase the reliability of road structures and reduce the coefficients of stock taking into account the real heterogeneity and quality control of the arrangement of asphalt pavements.

Keywords: asphalt concrete layers, reliability, coefficient of variation, technology of construction.

References

1. Deacon, J. A., C.L. Monismith, and J. T. Harvey. Pay Factors for Asphalt-Concrete Construction: Effect of Construction Quality on Agency Costs. TM-UCB-CAL/APT-97-1. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 47 pp., April 1997.

2. Mensching DJ, Myers McCarthy L, Mehta Y, Byrne M (2013) Modeling flexible pavement overlay performance for use with quality-related specifications. Constr Build Mater 48:1072–1080.

3. NCHRP (2009) Report 626: NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction. Transportation Research Board, Washington D.C.

4. NCHRP (2011) Report 704: A Performance-Related Specification for Hot-Mixed Asphalt. Transportation Research Board, Washington D.C.

5. Praticò F. G., Casciano A. Variability of HMA characteristics and its influence on pay adjustment. // Journal of Civil Engineering and Management. - 2015 Volume 21(1). – P. 119–130.

6. Warsame A (2013) Framework for Quality Improvement of Infrastructure Projects. J Civil Eng Archit 7(12) (Serial No. 73):1529–1539.

7. Rzhаницы́н А.Р. Теори́я расче́та строите́льн'ы́х констру́кци́й на наде́жность.- М.: Стройиздат, 1978. — 239С.

8. Bolotin V.V. Metody` teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenij. - М.: Strojizdat, 1982. — 351S.

9. Gameliak I`P. Zabezpechennya nadi`jnosti` konstrukci`j dorozhn`ogo odyagu. DIS. ... DOCT. TECH. S., Kiyiv. - NTU, 2008.

10. Radovskij B.S. Avtomobil`ny`e dorogi. Materialy` VI - Kongressa yevrobitum. – 1994.