

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., канд. хім. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-5206-9921>Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»),
м. Київ, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУР ЗА ТОВЩИНОЮ ШАРІВ АСФАЛЬТОБЕТОНУ І МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАЛЕЖНИХ ПАРАМЕТРІВ У ЦІЛЯХ ПРОЄКТУВАННЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

Анотація

Вступ. У статті розглянуто аспекти аналізування результатів випробування нежорсткого дорожнього одягу навантаженням, пов'язані з температурно-залежними характеристиками асфальтобетону.

Проблематика. Проблематика статті стосується питань прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону згідно з математичною моделлю *BELLS*, а також питань приведення параметрів оцінювання і проєктування нежорсткого дорожнього одягу до референтних значень температури.

Мета. Метою статті є аналізування основних положень моделі *BELLS* і моделювання основних температурно-залежних параметрів, що ураховуються під час проєктування нежорсткого дорожнього одягу та ґрунтуються на результатах визначання міцності конструкції і вимірювання чаші прогину за результатами випробування обладнанням *FWD* (прогиномір з падаючим вантажем).

Результати. Розглянуто вплив температур на деформаційні властивості матеріалів нежорсткого дорожнього одягу з виокремленням критичних характеристик — модуля пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону і параметрів форми чаші прогину, які визначають за результатами випробування дорожніх одягів навантаженням.

Виконано аналіз основних положень моделі прогнозування температур за товщиною шару асфальтобетону та розглянуто етапи розвитку моделі зі стандартизованим алгоритмом розрахунків відповідно до рівняння *BELLS*, який передбачає дві зміщені *sin*-функції в цілях урахування різної тривалості стадій нагрівання і охолодження шару асфальтобетону в конструкції впродовж повної доби.

У рамках механістично-емпіричної методології проєктування дорожнього одягу стисло проаналізовано моделювання температурно-залежних параметрів — модуля пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону і параметрів форми чаші прогину, а також прогину в точці прикладання навантаги. Розглянуто приклади виділення критичних параметрів розрахунку відповідно до характеристик конструкції — товщини шару асфальтобетону, міцності ґрунтової основи і розташування об'єкта. Окрему увагу приділено питанням верифікації моделі *BELLS* на об'єктах з різними кліматичними умовами.

Висновки. У сучасній практиці дорожнього будівництва випробування дорожнього одягу навантаженням є невід'ємною складовою оцінювання і проєктування нежорстких дорожніх одягів і поряд із цим потребує точних даних щодо температури у шарі асфальтобетону відповідно до умов випробування. Процедура випробування на прогин із застосуванням обладнання *FWD* ставить питання ефективності вимірювання температури у шарі асфальтобетону з наданням переваги прогнозуванню такої температури. Ефективним є прогнозування температури із застосуванням моделі, що ґрунтується на вісімнадцятигодинному циклі зростання та зниження температури асфальтобетону в конструкції впродовж повної доби, як це стандартизовано *ASTM*.

Перспективним напрямком впровадження такої стандартної моделі та відповідних алгоритмів оцінювання і проєктування дорожнього одягу в Україні є виконання науково-технічного супроводу з подальшою верифікацією та, очікувано, розширенням сфери застосування.

Ключові слова: асфальтобетон, випробування, модель *BELLS*, навантаження, нежорсткий дорожній одяг, прогин, прогнозування, температура, чаша прогину.

Вступ

Прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону є важливою складовою проєктування нежорсткого дорожнього одягу. Приведення певних параметрів до референтних (або потрібних) значень температури асфальтобетону з урахуванням температури на момент випробування дорожнього одягу навантаженням з вимірюванням прогинів є стандартною процедурою та може застосовуватися, наприклад, у загальновідомій механістично-емпіричній системі проєктування [1 – 3].

Поширений у світовій практиці дорожнього будівництва метод типових випробувань дорожніх одягів навантаженням із застосуванням обладнання *FWD* (*Falling Weight Deflectometer*, прогиномір з падаючим вантажем) та аналізування результатів таких випробувань у цілях оцінювання і проєктування потребують безпосереднього вимірювання температури у шарі асфальтобетону або прогнозування її за товщиною шару (шарів) асфальтобетону відповідно до умов випробування із застосуванням математичних моделей.

Вимірювання фактичних значень температури асфальтобетону на встановленій глибині під час загального обстеження мережі доріг чи на рівні окремого проєкту негативно впливає на ефективність робіт і, за певних обставин, може бути нездійсненним. Процедура висвердлювання в асфальтобетоні отворів для приладу вимірювання температури із заповненням мінеральним маслом та забезпеченням температурного балансу перед вимірюванням є тривалою. Поряд із цим, вимірювання значень температури асфальтобетону на глибині, установленій протоколом випробувань, може призвести до внесення похибок внаслідок нерівномірної товщини шару. Чинником похибок також є визначення температури асфальтобетону шляхом інтерполяції між двома точками вимірювань. Не завжди ефективним є й застосування системи реєстрації та збирання даних з установленням датчиків температури в дорожньому одязі. На відміну від перелічених обмежень процедур вимірювання температури прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону згідно із сучасними стандартними методами надає можливість виводити потрібні дані для будь-яких точок та широкого діапазону умов випробування [3, 4]. До таких методів потрібно віднести метод згідно зі стандартом [5].¹

З урахуванням викладеного вище в статті розглянуто теоретичні засади зі стислим історичним дискурсом розвитку методу прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону і — у рамках механістично-емпіричної системи проєктування, складовою якої є модель, аналогічна [5] — проаналізовано алгоритми моделювання температурно-залежних параметрів: модуля пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону і прогину / параметрів форми чаші прогину в цілях оцінювання і проєктування нежорсткого дорожнього одягу.

Вплив температури на деформаційні характеристики матеріалів нежорсткого дорожнього одягу

Основні результати досліджень із зазначеного напрямку представлено в першоджерелах [1, 2] відповідно до Програми сезонного моніторингу (*SMP, Seasonal Monitoring Program*) у рамках Довгострокової програми функціонування дорожнього одягу (*LTPP, Long-Term Pavement Performance*); дані були отримані в процесі випробувань секцій нежорсткого дорожнього одягу на

¹ Доцільно зазначити, що першоджерело [1] у редакції від 2002 року внесено до переліку нормативних посилань цього стандарту ASTM.

територіях США та Канади впродовж двох років із застосуванням обладнання *FWD*. Ділянки випробувань суттєво варіювалися за умовами роботи дорожнього одягу, за товщиною шару асфальтобетону (від 46 мм до 305 мм) і дисперсного шару основи². Характеристики бітумного в'язучого, характеристики та склад асфальтобетону в рамках *LTPP's SMP* не досліджувалися.

Визначальною в проєктуванні нежорсткого дорожнього одягу характеристикою асфальтобетону, або, за визначенням авторів [1], суміші бітумного в'язучого та щебневих (гравійних) матеріалів, є міцність, критерієм якої є значення модуля. У цілому деформаційні характеристики асфальтобетону залежать від його здатності до пружного, або відновлюваного, деформування та пластичності, а також від зміщення в часі прикладання навантаження і розвитку відповідних деформацій.

Асфальтобетон, на відміну від дисперсних матеріалів неукріпленого шару основи / додаткової основи, є чутливим до температур. Найбільш наочно це відображається зміною форми чаші прогину зі зміною температур³. Автори [1] пропонують ілюстративний матеріал (**рис. 1** та **рис. 2**), який підтверджує критичний вплив температури на прогини нежорсткого дорожнього одягу із шарами асфальтобетону за результатами випробування обладнанням *FWD*.

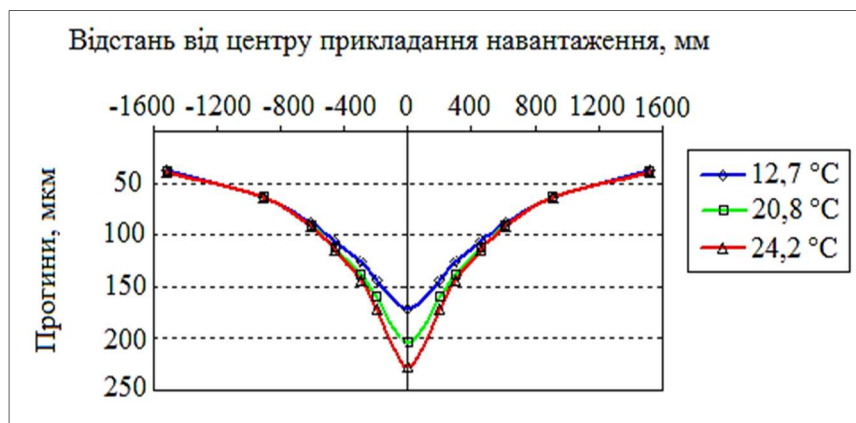


Рисунок 1 — Залежність прогину нежорсткого дорожнього одягу із шарами асфальтобетону від температури для однієї локації випробувань, визначена впродовж одного дня, згідно з [1]

Зображена на **рис. 1** схематична чаша прогину має декілька профілів, отриманих в одній точці протягом одного й того ж самого дня за різних температур. Вплив температури на прогини спостерігається тільки до певної відстані від центра прикладання навантаження, що пояснюється залежністю характеристик асфальтобетону від температури та відсутністю такої залежності для дисперсних матеріалів основи. Як стверджують автори [1], спостережений ефект не може бути віднесений на рахунок різної швидкості зміни температури у різних шарах конструкції дорожнього одягу.

² Нормалізацію виконували відносно навантаження 40 кН (~ 9 kip). Було охоплено об'єкти, географічна та кліматична локація яких обумовила стан обстежуваних конструкцій дорожнього одягу впродовж періоду моніторингу від «сухого, без змерзання» до «замерзлого у вологому стані». Ураховуючи дані [2] стосовно репрезентативних ділянок, об'єкти розташовано на західній довготі за північної широти від 26°98' до 51°89'; з більш детальною інформацією можна ознайомитися в першоджерелі.

³ Згідно з [6] термін «чаша прогину» описано таким чином: навантажування поверхні імпульсом сили, створеним обладнанням *FWD*, спричиняє миттєвий прогин дорожнього одягу чашоподібної форми під навантажувальною плитою, який характеризується певними параметрами.



Рисунок 2 — Залежність прогину нежорсткого дорожнього одягу із шарами асфальтобетону від температури для постійної локації випробувань, визначена впродовж року, згідно з [1]

На **рис. 2** наведено залежність прогинів від температури на середині глибини в шарі асфальтобетону для однієї точки випробування, впродовж одного року моніторингу. У даному випадку на залежність прогинів від температури поряд із чинниками випадкових похибок впливають сезонні чинники, що певною мірою визначає величину середньоквадратичного відхилення (**рис. 2**).

Масив даних *LTPP's SMP* дозволив вивести ефективну емпіричну модель регресійного аналізу *BELLS* — прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону залежно від температури поверхні шару, середньої температури повітря за попередню (перед виконанням випробування на прогин) добу в градусах Цельсія, часу виконання випробування та глибини в шарі асфальтобетону, для якої потрібно виконати прогнозування температури.

Розвиток моделей прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону Особливості прогнозування температури згідно з моделлю *BELLS*

Раніше запроваджена модель прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону в цілях проєктування нежорсткого дорожнього одягу згідно з *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (1993 р.) спиралася на дані стосовно температури повітря за п'ять попередніх (перед випробуванням на прогин) діб [3]. Проте ця модель була визнана незручною у використанні, оскільки на практиці впродовж п'яти діб переважно спостерігаються суттєві коливання температурних і погодних умов. У 1995 році на обговорення були винесені інші моделі прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону, зокрема такі, що ураховують середню температуру повітря за одну попередню добу, а також наявність різних градієнтів температур циклів нагрівання та охолодження. Потрібно додати, що розглядалося й прогнозування ефективної температури на третині товщини шару асфальтобетону (на відміну від прийнятої в *LTPP* ефективної температури на половині товщини шару) — як таке, що забезпечує меншу розбіжність обчислюваних параметрів за умов нагрівання та охолодження шару, оскільки на цій глибині швидкість нагрівання та охолодження асфальтобетону було знайдено однаковою, проте за результатами верифікації таку модель прийнято не було [3].

У подальшому були виведені рівняння регресії з поєднанням алгоритмів розрахунку температури для різних глибин — рівняння *BELLS* (акронім, складений з перших букв прізвищ розробників), адаптовані для вимірювань за протоколом *LTPP* (*BELLS2*) та для типових випробувань (*BELLS3*) зі стандартизацією другого методу в [5]. Потрібно зазначити, що згідно з [5] виконують прогнозування температури на глибині в шарі асфальтобетону від 25 мм до 150 мм; для глибини

понад 150 мм може бути виконано екстраполяцію, проте стандартну модель для глибини понад 150 мм не калібровано — методи екстраполяції можуть бути застосовними в науково-дослідних цілях.

У зв'язку з тим, що добові коливання температури шару асфальтобетону не можуть бути представлені симетричним синусоїдальним коливанням — період нагрівання є коротшим, охолодження — довшим, у моделі *BELLS*, з метою наближення форм хвиль температурних коливань протягом доби було запропоновано представлення у вигляді двох *sin*-функцій, що відповідають вісімнадцятигодинному циклу коливань температури, як наведено на **рис. 3**; один такий цикл дорівнює 2π рад.

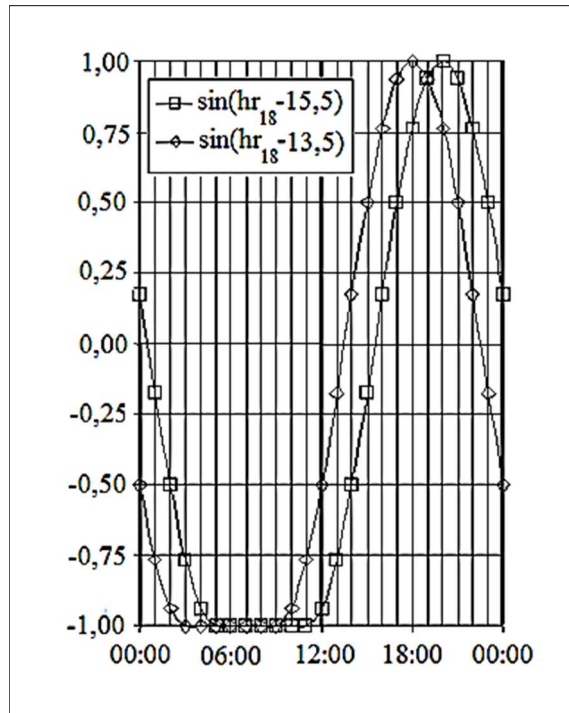


Рисунок 3 — Вісімнадцятигодинна *sin*-функція, застосована в рівняннях *BELLS*

Модель *BELLS* оперує основними параметрами згідно із загальним рівнянням (1):

$$T_d = \beta_0 + \beta_1 IR + [\log(d) - 1,25] [\beta_2 IR + \beta_3 T_{(1-day)} + \beta_4 \sin(hr_{18} - 15,5)] + \beta_5 IR \sin(hr_{18} - 13,5), \quad (1)$$

де T_d — температура асфальтобетону на глибині d , °C;

IR — температура на поверхні шару асфальтобетону, виміряна з застосуванням інфрачервоних датчиків, °C;

d — глибина (відстань під поверхнею шару асфальтобетону) для прогнозування температури, мм;

$T_{(1-day)}$ — середнє найбільшої та найменшої температур повітря за попередню добу, °C;

hr_{18} — час доби в 24-годинній системі, обчислений із застосуванням 18-годинного циклу зростання та зниження температури шару асфальтобетону;

$\log$ — десятковий логарифм.

Для виконання розрахунків значення часу вводять у десятковому численні.

Значення коефіцієнтів β_i для методів *BELLS2* та *BELLS3* згідно з [2, 4, 5] наведено в **табл. 1**.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів рівняння *BELLS* для різних протоколів

Коефіцієнт	<i>BELLS2</i>	<i>BELLS3</i>
β	+ 2,780	+ 0,950
β_1	+ 0,912	+ 0,892
β_2	– 0,428	– 0,448
β_3	+ 0,553	+ 0,621
β_4	+ 2,630	+ 1,830
β_5	+ 0,027	+ 0,042

Згідно з даними [2] за результатами 10 304 вимірювань установлено значення стандартної похибки та середньоквадратичного відхилення відповідно 1,8 °C і 0,977 для *BELLS2* й 1,9 °C та 0,975 — для *BELLS3*.

Згідно з протоколом *LTPP*, де застосовують рівняння *BELLS2*, алгоритм прикладання навантаження забезпечує загальну тривалість роботи обладнання *FWD* в кожній точці випробування від 5 хв до 6 хв [1]; аналогічною є тривалість затінення дорожнього одягу в точці випробування. Згідно з типовим випробуванням, коли застосовують рівняння *BELLS3*, у кожній точці виконують переважно чотири скидання падаючого вантажу, що триває орієнтовно 30 с та забезпечує короткочасне затінення. Таким чином різні значення коефіцієнтів *BELLS2* та *BELLS3* відповідають різним умовам виконання випробувань.

Застосування вісімнадцятигодинної функції часу в двадцятичотирьохгодинній системі передбачає введення плоского (такого, де $\sin = -1$) сегмента для періоду, коли температура асфальтобетону приймається сталою; для функції часу ($hr_{18} - 15,5$) плоский сегмент характеризує період від 05:00 год до 11:00 год, для функції ($hr_{18} - 13,5$) — період від 03:00 год до 09:00 год (рис. 3). Відповідно, у разі застосування $\sin (hr_{18} - 15,5)$ десяткової функції приймають лише години від 11:00 год до 05:00 год. Якщо фактичний час не охоплено цим інтервалом, тоді обчислюють $\sin$ за умови, що час становить 11:00 год (коли $\sin = -1$). У разі застосування $\sin (hr_{18} - 13,5)$ десяткової функції приймають лише години від 09:00 год до 03:00 год. Якщо фактичний час не охоплено цим інтервалом, обчислюють $\sin$ за умови, що час становить 09:00 год (коли $\sin = -1$).

У разі, коли випробування дорожнього одягу на прогин припадають на проміжок часу між опівночі та 05:00 год для випадку $\sin (hr_{18} - 15,5)$ та між опівночі й 03:00 год — для випадку $\sin (hr_{18} - 13,5)$, до фактичного часу в його десятковому численні додають 24 перед виконанням подальших розрахунків.

За результатами застосування моделі *BELLS* авторами [1, 2] були виведені й прийняті в проєктуванні й оцінюванні дорожнього одягу емпіричні залежності для приведення модулів пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону і прогинів / параметрів форми чаші прогину до потрібних значень температури.

Моделювання температурно-залежних параметрів у цілях проєктування й оцінювання нежорсткого дорожнього одягу

Оскільки прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону з застосуванням моделі *BELLS* є складовою механістично-емпіричної системи проєктування дорожнього одягу, доцільно стисло розглянути моделювання температурно-залежних параметрів, визначальних для розрахунків. Як зазначено у [1], після обчислення температур на потрібній глибині в шарі асфальтобетону можуть бути розраховані значення прогинів, модулів пружності конструкції із

шаром покриття з асфальтобетону⁴ (далі — МПКА) та параметри форми чаші прогину за потрібних значень температури.

Моделювання модулів асфальтобетону

Розглянемо окремі результати, отримані авторами [2] у процесі реалізації різних програм зворотного розрахунку (методи ітерації, пошуку в базі даних та перетворення Бусинеска-Одемарка), які дозволили вивести регресійну залежність *ATAF* (*Asphalt Temperature Adjustment Factor*) — поправного коефіцієнта температури асфальтобетону для значень МПКА.

Спочатку розглянемо оцінювання потрібних МПКА нежорсткого дорожнього одягу на основі залежності (2):

$$\log(E_{ac}) = A + B \cdot T, \quad (2)$$

де E_{ac} — модуль пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону;

T — температура на середині глибини в шарі асфальтобетону;

A та B — сталі рівняння.

Авторами було виведено залежність значень сталих A і B від географічної широти, як наведено на **рис. 4** і **рис. 5**; автори підкреслюють, що внаслідок впливу низки чинників ці залежності можуть бути прийняті лише для приблизного — грубого оцінювання МПКА.

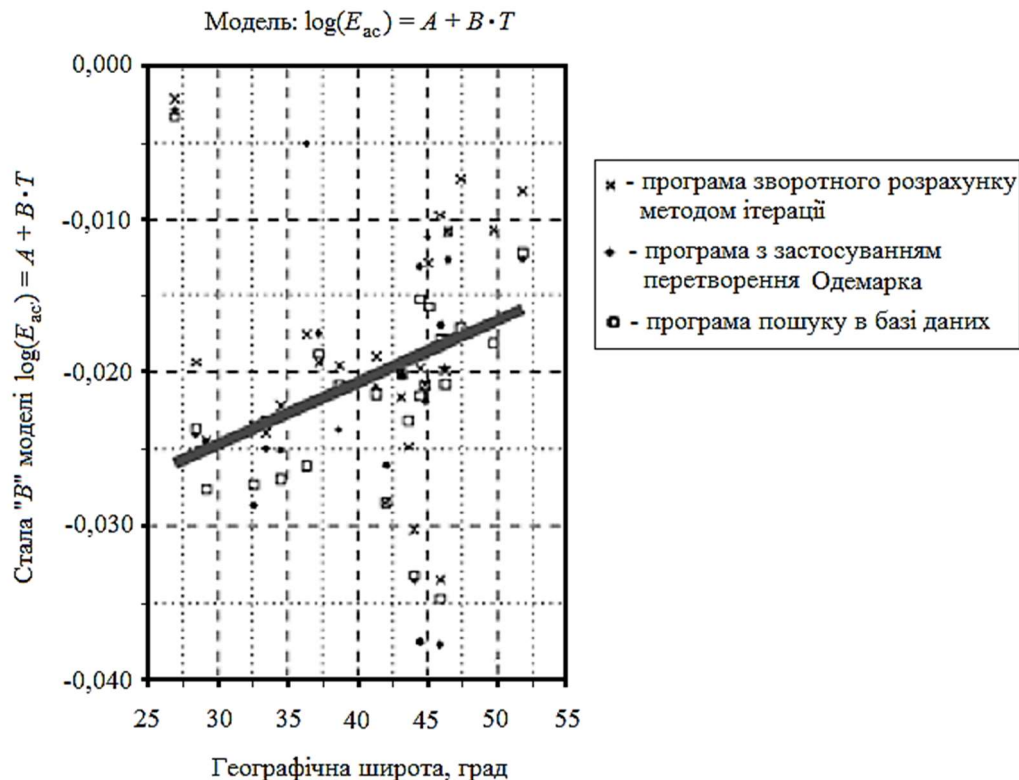


Рисунок 4 — Стала "B" залежності (2) відповідно до географічної широти (спостереження на об'єктах США та Канади)

⁴ Стосується МПКА, отриманих зворотним розрахунком. З більш детальною інформацією стосовно виконання зворотних розрахунків у цілях оцінювання і проектування дорожнього одягу можна ознайомитися в [7]. Станом на час роботи над рукописом статті колектив ДП «НІРІ» займається розробленням національного стандарту України, ідентичного [7] — очікувано в цілях науково-технічного супроводу.

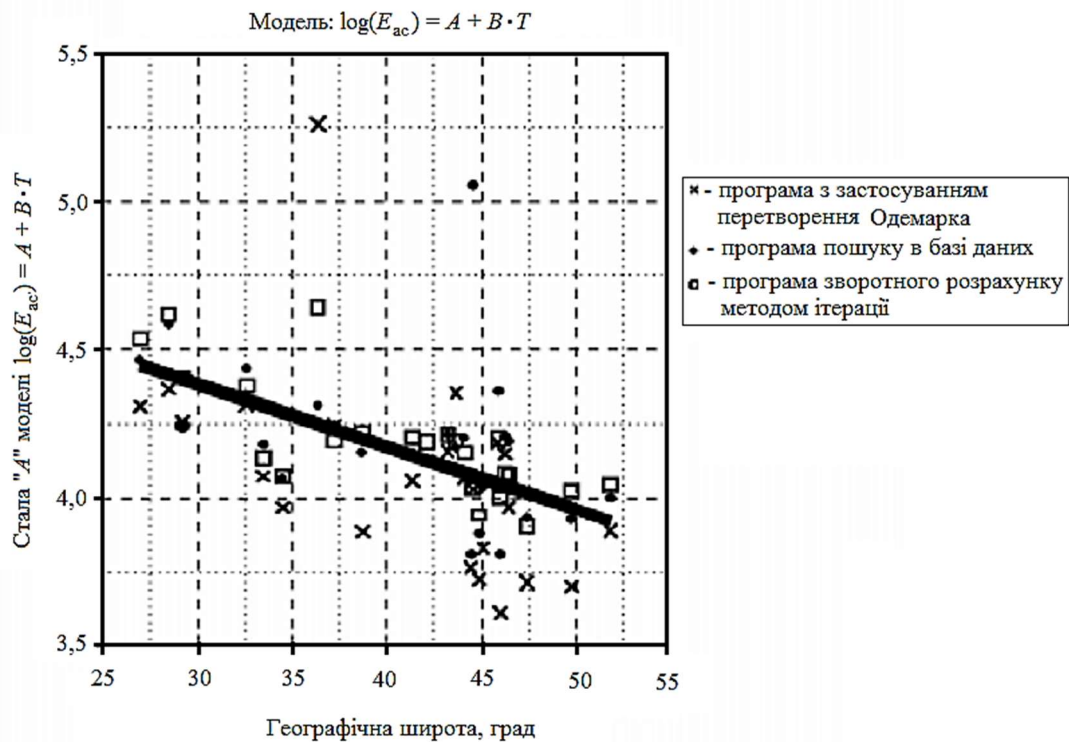


Рисунок 5 — Стала "А" залежності (2) відповідно до географічної широти

Як видно з **рис. 4**, представлення значень МПКА у формі десяткового логарифма приводить до від'ємних значень сталої "В", оскільки з підвищенням температури значення МПКА зменшуються. Потрібно додати, що графічні залежності, наведені на **рис. 4** і **рис. 5**, виведено на підставі розрахунків за практично всіма точками спостережень *LTPP's SMP*, тоді як значення розрахункових параметрів, отримуваних впродовж періоду спостережень на одній локації, характеризуються більшими коефіцієнтами кореляції та меншою стандартною похибкою.

Для обчислення *ATAF*, відповідно до подання значень МПКА у формі десяткових логарифмів, було запропоновано рівняння (3) [2]:

$$ATAF = 10^{\text{slope}(T_r - T_m)}, \quad (3)$$

де $B(\text{slope})$ — стала рівняння залежності десяткового логарифма МПКА від температури;
 T_r — референтне значення температури асфальтобетону;
 T_m — значення температури на середині глибини в шарі асфальтобетону на момент випробовування.

Значення сталої "В" приймали як типові для об'єктів спостереження, отримані за результатами випробувань — так, згідно з [2] приймали значення від «мінус 0,0195» до «мінус 0,021». Автори вказують, що отримані значення різняться для точок вимірювання, розташованих на смузі кочення коліс та на середині смуги руху (доцільно зазначити, що таким чином може проявлятися вплив загальної тривалості затінення асфальтобетону, оскільки на смузі кочення коліс значення "В" можемо розглядати як такі, що зміщені в напрямку більш високих широт відповідної осі). Для розрахунків згідно з [1] за відсутності інших даних рекомендовано приймати $B = -0,021$.

Температурно-залежне моделювання параметрів форми чаши прогину

Як було зазначено вище, МПКА є критично чутливим до температури матеріалу. Оскільки в разі навантажування нежорсткого дорожнього одягу з шарами асфальтобетону форма чаши прогину значною мірою визначається міцнісними характеристиками, зокрема МПКА, використання

параметрів форми чаші прогину в оцінюванні дорожнього одягу потребує обов'язкового коригування таких параметрів відносно температури.

Положення, розглянуті далі в цьому розділі статті, були опрацьовані авторами [2] для семисенсорної конфігурації системи датчиків прогину; автори виконували температурно-залежне моделювання таких параметрів форми чаші прогину *BSF* (*Basin Shape Factor*): *AREA*, *F-1*, *Deflection delta*, *Deflection ratio*. Привернемо увагу — окремі параметри, прийняті як критичні для певних конструкцій дорожнього одягу (товщина шару асфальтобетону, міцність ґрунтової основи, географічне розташування об'єкта).

Параметр *AREA* характеризує безрозмірну площу чаші прогину, отриману шляхом нормалізації вимірюваних прогинів відносно прогину в центрі. Із загальним рівнянням для розрахунків *AREA* — для будь-якої кількості датчиків прогину, більшої ніж 2 — можна ознайомитися у [7]. Параметр *AREA* є найбільш широко застосовуваним у практиці дорожнього будівництва у цілях оцінювання конструкції дорожнього одягу за результатами випробувань на прогин⁵.

Параметр форми *F-1* дозволяє обчислювати, у безрозмірному поданні, кривизну в межах чаші прогину; такий розрахунок виконують діленням різниці прогинів на датчиках *defl0* та *defl24* на прогин *defl12*, де число зазначає регламентовану відстань певного датчика від центра прикладання навантаги, виражену в дюймах.

Параметри *delta* та *ratio* характеризують відповідно різницю та відношення прогинів в центрі прикладання навантаги й на регламентованій (відповідно до розташування регламентованої кількості датчиків прогину) відстані від центра прикладання навантаги. Ці параметри позначають як *delta_i* та *ratio_i*, де «*i*» — відстань певного *i*-го датчика від центра прикладання навантаги, виражена в дюймах. Згідно з [1] параметр *delta12* є еквівалентом кривизни поверхні.

Авторами [1, 2] було виведено математичні моделі, що описують залежність чотирнадцяти параметрів форми чаші прогину від температури на середині глибини в шарі та власне товщини шару асфальтобетону, прогину *defl36* і географічної широти θ . З чотирнадцяти параметрів форми чаші прогину зворотна залежність від температури асфальтобетону виведена лише для *AREA* [1]. Стосовно *defl36* потрібно додати, що всі параметри форми чаші прогину є прямо чи опосередковано залежними від відношення міцності (жорсткості) дорожнього одягу до міцності (жорсткості) ґрунтової основи, що в розглянутому авторами [2] прикладі розрахунку параметрів конструкції характеризується величиною *defl36*.

Значення поправних коефіцієнтів *BAF* (*Basin Adjustment Factor*) для кожного з параметрів форми чаші прогину обчислюють шляхом приведення значення параметра за референтної температури до його значення за температури на момент вимірювання; згідно з [1] рекомендовано складати таблиці *BAF* для параметрів *AREA* та *F-1*.

Температурно-залежне моделювання прогину в центрі прикладання навантаги

Окрему увагу приділено виведенню залежності прогину в центрі прикладання навантаги *defl0* від температури на середині глибини в шарі асфальтобетону. Для виведення математичної моделі температурно-залежного поправного коефіцієнта (*TAF* (*Temperature Adjustment Factor*)) для *defl0* на аналізованому об'єкті було використано значення *delta36* і виведено рівняння (4):

$$TAF = \frac{defl36 + delta36_{Tr}}{defl36 + delta36_{Tm}}, \quad (4)$$

де $delta36_{Tr}$ — значення параметра *delta36* за референтної температури;
 $delta36_{Tm}$ — значення параметра *delta36* за температури на момент вимірювання.

На **рис. 6** зображено відповідно отриману коригувальну залежність для шару асфальтобетону за референтної температури 21 °C згідно з [1].

⁵ З доступними широкому колу читачів першоджерелами з даного напрямку можна ознайомитися у [8].

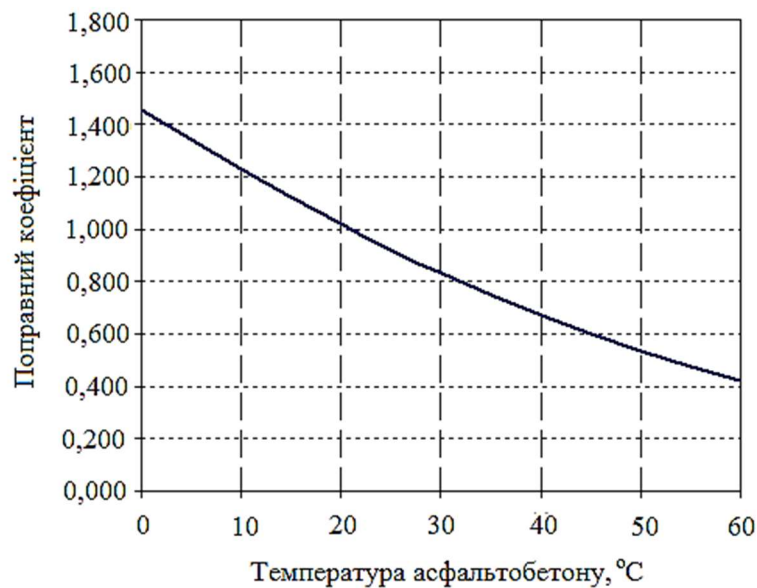


Рисунок 6 — Поправний коефіцієнт за товщини шару асфальтобетону 200 мм і значень $defl36 = 45$ мкм та географічної широти 40°

Автори [1] вказують, що, не зважаючи на існування загальної залежності прогину в центрі прикладання навантаги від температури, на цю залежність впливають також товщина шару та міцність асфальтобетону і, меншою мірою, міцність основи й ґрунтової основи⁶, внаслідок чого виведення зазначеної загальної залежності є ускладненим.

Доцільно також додати, що автори [2] вказують на ефективність застосування параметра δ_{tai} для коригування прогинів і рекомендують приймати параметр δ_{24} за товщини асфальтобетону до 100 мм включно, δ_{36} — за значень товщини асфальтобетону понад 100 мм до 200 мм включно, та δ_{60} — за таких значень понад 200 мм.

Виконаний вище аналіз результатів досліджень підтверджує високу ефективність запропонованого підходу до прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону і моделювання температурно-залежних параметрів у процесі проєктування й оцінювання нежорсткого дорожнього одягу, і поряд із цим ставить важливі питання адаптації відповідних алгоритмів аналізування в Україні.

Окремі питання верифікації моделі *BELLS*

У першоджерелах [3, 4, 9, 10] дискутується питання ефективності моделі *BELLS* за високих, 40°C та вище, температур асфальтобетону. Автори [3] вказують на невідповідність у вигляді занижених прогнозованих значень температури відносно фактичних у разі досягнення температури асфальтобетону 32°C та вище — було надано припущення, що чинником такої невідповідності є географічне розташування об'єктів основоположних досліджень.

Дослідження [9, 10], автори яких стверджують «недооцінювання» прогнозних значень температури за досягнення температур асфальтобетону 40°C та вище, виконували для об'єктів на низьких широтах, проте виникають питання стосовно розбіжності умов випробувань (у окремих випадках — невідповідності умов впровадженням стандартним положенням) та можливого впливу таких чинників на надані авторами [9, 10] висновки.

Автори роботи [4] приводять результати досліджень колег з південних штатів США (відповідно до границь штату — об'єкти на північній широті між 26° та 36°), згідно з якими рівняння

⁶ У цій статті переклад «міцність» застосовано для англomовного відповідника «*stiffness*».

BELLS2 потребувало коригування коефіцієнтів для забезпечення належних значень середньоквадратичного відхилення: так, до виконання калібрування це рівняння приводило до результатів зі значенням $R^2 = 0,878$, після калібрування з коригуванням коефіцієнтів β_i було забезпечено $R^2 = 0,92$.

Власні дослідження авторів [4] для об'єктів на території США (відповідно до границь штату — на північній широті між 42° та 49°) також показали необхідність калібрування рівняння *BELLS2* для забезпечення належного значення середньоквадратичного відхилення, яке становило, до та після калібрування, 0,886 та 0,913 відповідно.

У **табл. 2** наведено значення коефіцієнтів β_i для *BELLS2* на підставі даних [4].

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів BELLS2 з коригуванням на різних об'єктах

Коефіцієнт	Вихідна модель	Модель, коригована для об'єктів на північній широті між 26° та 36°	Модель, коригована для об'єктів на північній широті між 42° та 49°
β	+ 2,780	+ 1,472	+ 1,5008
β_1	+ 0,912	+ 1,079	+ 1,2919
β_2	– 0,428	– 0,924	– 0,8750
β_3	+ 0,553	+ 0,979	+ 0,5300
β_4	+ 2,630	– (оцінено як незначущий)	+ 1,4128
β_5	+ 0,027	+ 0,065	+ 0,0447

Автори [4] розглядають результати власних випробувань як доповнення до результатів *LTPP's SMP* (*LTPP's SMP* охоплює 10 304 вимірювань, дослідження [4] — 596 вимірювань), та запропоновану ними модель *BELLS2* — як калібровану.

Стосовно *BELLS3* зі значеннями β_i відповідно до [5] було отримано результати з $R^2 = 0,834$, що є значно нижче за встановлене в стандарті [5] значення $R^2 = 0,975$, проте калібрування *BELLS3* у дослідженні [4] не виконували — автори зазначають, що калібрування *BELLS3* приведе, з точки зору кореляційних параметрів, до отримання результатів, ідентичних калібруванню *BELLS2*.

Потрібно додати, що вплив значень, отримуваних обчислюванням відповідно до рівнянь *BELLS* до та після калібрування, на результати стандартизованих проєктних розрахунків дорожнього одягу авторами розглянутих робіт не засвідчено.

Висновки

У сучасній світовій практиці дорожнього будівництва випробування дорожніх одягів навантаженням з вимірюванням прогинів із застосуванням обладнання *FWD* є невід'ємною складовою обстеження стану мережі автомобільних доріг, а також окремих ділянок — з метою визначення та локалізації дефектів конструкції дорожнього одягу та / або ґрунтової основи.

Виконання таких випробувань і застосування результатів у цілях оцінювання й проєктування нежорсткого дорожнього одягу потребує приведення значень прогинів і модулів пружності конструкції із шаром покриття з асфальтобетону, отримуваних зворотним розрахунком, до референтних або потрібних значень температури, що, у свою чергу, потребує вимірювання або прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону за умов випробування.

Вимірювання температури у шарі асфальтобетону під час виконання *FWD*-випробувань накладає ряд процедурних обмежень і у певних випадках, може бути нездійсненним. Альтернативою визначенню фактичних значень є прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону.

Ефективним є прогнозування температури за товщиною шару асфальтобетону відповідно до моделі *BELLS*, яка ґрунтується на вісімнадцятигодинному циклі зростання і зниження температур асфальтобетону в конструкції впродовж повної доби і є стандартизованою в системі стандартів *ASTM*. Зазначений алгоритм прогнозування температур є, зокрема, складовою широко застосовуваної механістично-емпіричної системи проєктування дорожнього одягу.

Впровадження в Україні стандартних методів випробувань дорожніх одягів навантаженням (та, відповідно, стандартних методів, які підтримують розрахунки) є безальтернативним. Ураховуючи практику та стандарти в національній галузі дорожнього будівництва, окремою метою верифікації моделі *BELLS* може бути підтвердження її придатності для бітумів різного походження — характеристики бітумного в'язучого та власне асфальтобетонів у рамках основоположних робіт [1, 2] не досліджувалися.

Як ефективний напрямок застосування стандартів, гармонізованих із міжнародними стандартами *ASTM* щодо випробувань дорожніх одягів навантаженням, потрібно розглядати вирішення питань науково-технічного супроводу об'єктів будівництва транспортної інфраструктури.

Список літератури

1. LTPP Guide to Asphalt Temperature Prediction and Correction (A HTML document). Federal Highway Administration, Office of Research, Development, and Technology, Office of Infrastructure. 2016 (as last modified one). 9 p. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/lists/technical/infrastructure/pavements/ltp/> (дата звернення 19.03.2024).
2. Lukanen, E.O., Stubstad, R., and Briggs, R. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavements. Research Report FHWA-RD-98-085, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296. 2000. 79 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15368> (дата звернення 19.03.2024).
3. Inge, E.H., and Kim, Y.R. Prediction of effective asphalt layer temperature. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, Washington DC, USA, Vol. 1473. 1995. P. 93–100. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1473/1473-011.pdf> (дата звернення 13.03.2024).
4. Kassem, E., Bayomy, F.M.S., Williams, C., Saasita, E., Lamichane, S., Permadi, D.D. Development of Pavement Temperature Prediction Model. Idaho Department of Transportation Research Record RP 279. 2020. 62 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/56871/dot_56871_DS1.pdf (дата звернення 19.03.2024).
5. ASTM D7228-06a (2020) Standard Test Method for Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 3 p.
6. Long-Term Pavement Performance Program Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements. FHWA-HRT-06-132, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296. 2006. 82 p. URL: <https://highways.dot.gov/media/6001> (дата звернення 25.03.2024).
7. ASTM D5858-96 (2020) Standard Guide for Calculating *In Situ* Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 7 p.
8. Терещенко Т. А., Ілляш С. І. Можливості стандартних методів випробування дорожніх одягів навантаженням. *Автошляховик України*. 2022, № 1. Вип. 269. С. 66–74.
9. Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. Prediction of depth temperature of asphalt layers in hot climate area. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018. Vol. 24. Issue 7. P. 516–525. URL: <https://www.researchgate.net/publication/328961821> (дата звернення 13.03.2024 p.).

10. C. C. Liao, B. R. Chen, S. H. Chen, W. H. Huang. Temperature Prediction Model for Flexible Pavements in Taiwan. Selected Papers from the 2009 Geohunan International Conference “Performance modeling and evaluation of pavement systems and materials”. (August 3–6, 2009 Changsha, Hunan, China). P. 82–89. URL: <https://zlibrary.to/dl/performance-modeling-and-evaluation-of-pavement-systems-and-materials-selected-papers-from-the-2009-geohunan-international-conference-august-3-6-2009-changsha-hunan-china> (дата звернення 19.03.2024).

References

1. LTPP Guide to Asphalt Temperature Prediction and Correction (A HTML document). Federal Highway Administration, Office of Research, Development, and Technology, Office of Infrastructure. 2016 (as last modified one). 9 p. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/lists/technical/infrastructure/pavements/ltp/> (Accessed 19.03.2024) [in English].
2. Lukanen, E.O., Stubstad, R., and Briggs, R. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavements. Research Report FHWA-RD-98-085, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296. 2000. 79 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15368> (Accessed 19.03.2024) [in English].
3. Inge, E. H., and Kim, Y. R. Prediction of effective asphalt layer temperature. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, Washington DC, USA, Vol. 1473. 1995. P. 93–100. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1473/1473-011.pdf> (Accessed 13.03.2024) [in English].
4. Kassem, E., Bayomy, F.M.S., Williams, C., Saasita, E., Lamichane, S., Permadi, D. D. Development of Pavement Temperature Prediction Model. Idaho Department of Transportation Research Record RP 279. 2020. 62 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/56871/dot_56871_DS1.pdf (Accessed 19.03.2024) [in English].
5. ASTM D7228-06a (2020) Standard Test Method for Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 3 p. [in English].
6. Long-Term Pavement Performance Program Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements. FHWA-HRT-06-132, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296. 2006. 82 p. URL: <https://highways.dot.gov/media/6001> (Accessed 25.03.2024) [in English].
7. ASTM D5858-96 (2020) Standard Guide for Calculating *In Situ* Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 7 p. [in English].
8. Tereshchenko T. A., Illiash S. I. Mozhlyvosti standartnykh metodiv vyprobuвання dorozhnikh odiahiv navantazhenniam (Scopes of standard methods for testing road pavements by loading). *Avtošljachovyk Ukraïny*. 2022, No. 1, Issue 269. P. 66–74 [in Ukrainian].
9. Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. Prediction of depth temperature of asphalt layers in hot climate area. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018. Vol. 24. Issue 7. P. 516–525. URL: : <https://www.researchgate.net/publication/328961821> (Accessed 13.03.2024) [in English].
10. C. C. Liao, B. R. Chen, S. H. Chen, W. H. Huang. Temperature Prediction Model for Flexible Pavements in Taiwan. Selected Papers from the 2009 Geohunan International Conference “Performance modeling and evaluation of pavement systems and materials”. (August 3–6, 2009 Changsha, Hunan, China). P. 82–89. URL: <https://zlibrary.to/dl/performance-modeling-and-evaluation-of-pavement-systems-and-materials-selected-papers-from-the-2009-geohunan-international-conference-august-3-6-2009-changsha-hunan-china> (Accessed 19.03.2024) [in English].

Tatyana Tereshchenko, Ph.D., Sen. Research, <https://orcid.org/0000-0001-5206-9921>

State Enterprise "National Institute for Development Infrastructure" (SE "NIDI"), Kyiv, Ukraine

PREDICTION OF TEMPERATURES WITHIN THE DEPTH OF ASPHALT CONCRETE LAYERS AND THE MODELING OF TEMPERATURE-DEPENDENT PARAMETERS FOR FLEXIBLE ROAD PAVEMENTS DESIGN PURPOSES

Introduction. The introduction to the paper highlights the aspects of the analysis of results of flexible road pavement load test which shall be related to the temperature-dependent characteristics of asphalt concrete.

Problem statement. The issues of the paper concern the questions of prediction of temperature within the asphalt concrete layer by the BELLS mathematical model and also the adjustment of the flexible pavement's assessment and design parameters to the reference temperatures.

Purpose. The goal of the paper is to analyze the main provisions of the BELLS model and also provisions for modeling the basic temperature-dependent parameters taken into account when designing the flexible road pavements and which are based on the results of the construction stiffness and deflection basin measurements that were performed through the FWD (Falling-Weight Deflectometer) test.

Results. The effect of temperatures on the flexible road pavement materials' deformational properties was reviewed with separating crucial characteristics such as asphalt concrete modulus and basin shape factors obtained using the road pavements load tests results.

Also the analysis of main provisions of the model for asphalt concrete layer temperature prediction was performed and the evolution of the on the BELLS equation based model with standard calculation algorithm was described which considers two sin-function with the offset to cover the different duration of the stages of asphalt concrete temperature rising and falling in a construction through the whole day.

Within the mechanistic-empirical approach to the road pavement design, the modeling of temperature-dependent parameters such as asphalt concrete moduli, and basin shape factors, and deflection in the point of loading were briefly analyzed. Also, the examples of the selection of significant parameters for calculation were reviewed in accordance with the characteristics of a construction, namely the asphalt concrete layer thickness, stiffness of the subgrade and the object's geography. The attention was paid to the questions of the BELLS model verification on the objects with various climatic conditions.

Conclusions. Within the contemporary practice for the highway construction, the road pavement load tests are the integral part of the flexible road pavements assessment and design requiring along with that the precise data regarding temperatures in the asphalt concrete layer according to the test conditions. The deflection testing procedure with usage the FWD device questions the efficiency of the measurement of temperatures in an asphalt concrete layer giving preference to the temperatures prediction. The highly effective one is the prediction of these temperatures via the model based on the 18-hr cycle of rising and falling of temperatures of asphalt concrete in a construction through the whole day as it was standardized by ASTM.

The actual direction of the implementation of such a standard model and related approaches to the road pavements assessment and design in Ukraine should be the scientific-engineering support for construction of highways with further verification and, expectedly, enlargement of scopes of that model application.

Keywords: asphalt concrete, load test of road pavements, deflection, *BELLS* model, flexible road pavement, prediction, temperature, deflection basin.