https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.158

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

АСПЕКТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ В ЦІЛЯХ ПРОЄКТУВАННЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

Анотація

Вступ. У вступі до статті описується вплив критичних температур і температурних навантажень на експлуатаційні характеристики асфальтобетонного покриття, а також на конструкцію нежорсткого дорожнього одягу в цілому.

Проблематика. Проблематика статті стосується важливих аспектів прогнозування температурних режимів асфальтобетонного покриття, застосовуваних в різних системах проєктування нежорстких дорожніх одягів.

Мета. Основною метою статті є розгляд та порівняння підходів до проєктування нежорсткого дорожнього одягу на підставі розрахункових температур асфальтобетонного покриття, яких може бути досягнуто за критичних умов експлуатації дорожнього одягу.

Результати. Розглянуто застосування теорії термічної дифузії як підґрунтя для опису процесів встановлення температурної рівноваги в асфальтобетонному покритті. Передбачається, що за досягнення максимальної температури асфальтобетонного покриття існує рівновага між вихідними та вхідними потоками, такими як вихідне та вхідне довгохвильове випромінення, короткохвильове вхідне випромінення, конвекційні втрати та теплопередача. Після досліджень у рамках програми *SHR* максимальні температури асфальтобетонного покриття, розраховані на підставі такого балансу теплових потоків, були запропоновані в цілях проєктування нежорсткого дорожнього одягу.

Також проаналізовано результати досліджень, проведених у розвиток запропонованої теорії температурної рівноваги, і встановлено, що за певних метеорологічних умов максимальна температура асфальтобетонного покриття не буде супроводжуватися температурною рівновагою; подальший перерозподіл теплових потоків може призвести до того, що значення температур суттєво перевищать розрахунковий максимум.

Далі розглянуто окремі аспекти прогнозування температур асфальтобетонного покриття з допомогою *3D FEM* моделі, побудованої з урахуванням теорії термічної дифузії, у перехідний зимово-весняний період. Аналогічний підхід, що ґрунтується на моделюванні процесу утворення відображених тріщин у асфальтобетонному покритті під впливом температурних навантажень, було визнано ефективним інструментом для розробки стратегії ремонтів асфальтобетонного покриття.

Висновки. Впроваджені у світовій практиці системи проєктування нежорсткого дорожнього одягу оперують розрахунковими значеннями температур асфальтобетонного покриття, яких може бути досягнуто за критичного впливу метеорологічних чинників. Залежно від вирішуваної проблеми у вихідних даних проєктування приймаються екстремальні значення або градієнти температур покриття.

Прогнозування температур асфальтобетонного покриття і розрахунок температурних режимів дорожнього одягу здійснюють на підставі балансу потоків випромінення. Розрахункові значення максимальних температур асфальтобетонного покриття можуть бути суттєво перевищені внаслідок особливостей процесу встановлення температурної рівноваги в покритті. Розрахункові

критичні значення температур асфальтобетонного покриття дозволяють більш ефективно — порівняно із середніми значеннями, отриманими за результатами спостережень — моделювати відклик конструкції нежорсткого дорожнього одягу на вплив навантажень.

Ключові слова: дорожній одяг нежорсткий, асфальтобетонне покриття, баланс потоків випромінення, моделювання температурного режиму покриття.

Вступ

Температурні навантаження та критичні температури суттєво впливають на стан асфальтобетонного покриття, особливо за умов сучасних високих навантажень від руху транспортних засобів. Ураховуючи сукупний вплив зовнішніх чинників, асфальтобетонне покриття працює за умов високих напружень та деформацій. За впливу низьких зимових температур асфальтобетонне покриття набуває жорсткості та високої здатності до тріщиноутворення; навантаження від руху транспортних засобів сприяють розвитку тріщин. За впливу високих літніх температур асфальтобетонне покриття набуває пластичності та високої здатності до накопичення пластичних деформацій; навантаження від руху транспортних засобів призводять до утворення колії [1].

Актуальною є також проблема утворення та розвитку — внаслідок сукупної дії температурних і механічних навантажень — відображених тріщин [2]. Однією із застосовуваних стратегій ремонтів нежорсткого дорожнього одягу є укладання нового шару асфальтобетону після належного підготування основи — старого асфальтобетонного покриття. В улаштованих покриттях може спостерігатися утворення відображених тріщин над відремонтованими тріщинами старого покриття, при цьому автори [2] зазначають суттєвий негативний вплив температурних навантажень.

Зазначені вище процеси призводять до деформацій та руйнування асфальтобетонного покриття, а також до зниження строку служби конструкції дорожнього одягу в цілому. Відповідно до цього, визначання температурного режиму та прогнозування температур асфальтобетонного покриття за критичних впливів є важливим складником проєктування конструкцій нежорсткого дорожнього одягу.

Підходи до створення бази вихідних даних для проєктування нежорсткого дорожнього одягу в частині температур покриття різняться відповідно до вимог різних систем проєктування. Як свідчить аналіз науково-технічної літератури, перевагу потрібно надавати алгоритмам проєктування з урахуванням розрахункових температур покриття за впливу критичних чинників; такий підхід є інформативним з точки зору прогнозування відклику конструкції на екстремальні навантаження. Актуальність відповідних питань зростає у зв'язку зі змінами клімату та підвищенням кількості зареєстрованих випадків кліматичних, зокрема температурних, аномалій.

З урахуванням викладеного вище в статті виконано аналіз підходів до визначання температурних режимів асфальтобетонного покриття в цілях проєктування нежорсткого дорожнього одягу, застосовуваних у практиці дорожнього будівництва.

Застосування інформації щодо температурних режимів асфальтобетонного покриття в цілях проєктування дорожнього одягу

Дані щодо температур покриття — фактично виміряні та прогнозовані значення — є важливим аспектом конструювання та розрахунку нежорсткого дорожнього одягу у проєктах з нового будівництва, ремонтів і реконструкції автомобільних доріг.

Фактичні значення температур асфальтобетонного покриття визначаються на метеостанціях з метою створення бази даних щодо кліматичних параметрів умов роботи асфальтобетонного покриття, з обчисленням значень середньої максимальної (літньої) і середньої мінімальної (зимової) температур покриття для конструювання та розрахунку нежорсткого дорожнього одягу [3].

Поряд із цим, у широко застосовуваних у світовій практиці дорожнього будівництва системах проєктування нежорсткого дорожнього одягу важливими вихідними даними є розрахункові критичні (максимальні та мінімальні) значення температур асфальтобетонного покриття.

Прогнозування критичних значень максимальних температур асфальтобетонного покриття ґрунтується на теорії термічної дифузії, яка охоплює взаємодію короткохвильового та довгохвильового випромінення з земною поверхнею, де вказані максимальні значення можуть бути розраховані на підставі даних щодо максимальної температури повітря та кількісних погодинних даних стосовно сонячного випромінення. Відповідний підхід до конструювання та розрахунків асфальтобетонного покриття (зокрема метод класифікації бітумних в'яжучих) був опрацьований та впроваджений програмою стратегічних досліджень автомобільних доріг *SHRP* (*Strategic Highway Research Program*) для різних регіонів США та Канади [4]. Було показано, що залежність між значеннями максимальних температур повітря та асфальтобетонного покриття має практично лінійний характер, та різниця цих значень є очікувано меншою для більш високих широт; поряд з цим вирішальний вплив на максимальну літню температуру асфальтобетонного покриття має максимальне (серед виміряних за добу, почасово) значення сонячного випромінення.

Стосовно мінімальних зимових температур асфальтобетонного покриття автори [4] вказують, що мінімальна зимова температура асфальтобетонного покриття перевищує мінімальну температуру повітря на (1–2) °С, тому прийнятним є припущення щодо однаковості значень мінімальної температури асфальтобетонного покриття та повітря.

Підходи до прогнозування температур асфальтобетонного покриття в цілях проєктування нежорсткого дорожнього одягу

Прогнозування температури покриття, визначання температурного режиму здійснюють із застосуванням різних математичних моделей, в основу яких покладено баланс потоків випромінення.

Автори [1] застосовували математичну модель на основі балансу потоків випромінення для прогнозування максимальної літньої температури асфальтобетонного покриття за тривалого впливу метеорологічних чинників, які можуть підвищувати температуру асфальтобетонного покриття. Застосовувана авторами [1] математична модель прогнозування максимальної (літньої) температури асфальтобетонного покриття, раніше описана в роботі [4], передбачає встановлення температурної рівноваги в об'єкті за умов досягнення максимальної температури, відповідно до чого результуюче значення теплового потоку q_{net} (*net rate of heat flows*) [4] приймається таким, що дорівнює нулю.

Згідно з [4], складовими балансу потоків випромінення є:

– надхідне довгохвильове випромінення q_{α}, Вт/м^2 — охоплює довгохвильове випромінення, спрямоване з атмосфери на поверхню [дорожнього одягу] — розраховується за рівнянням (1)[1]:

$$q_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha} \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}}^4, \tag{1}$$

де ε_{α} — коефіцієнт, значення якого, згідно з даними [1], у сонячний день приймається як 0,7;

σ — стала Стефана-Больцмана, Вт/(м^{2}К^4);

T_{air} — температура повітря, у градусах Кельвіна;

[1] Згідно з системою «Національна стандартизація», Україна, одиницю виміру «Вт/м^2» віднесено до величини «поверхнева густина потоку випромінення». Застосовані авторами робіт [1, 4] познаки величин, наведені в рівняннях (1) – (7), а також терміни в окремих випадках не співпадають з прийнятими в національній системі стандартизації України.

– вихідне довгохвильове випромінення q_r, Вт/м^2 — охоплює довгохвильове випромінення з поверхні [дорожнього одягу] в атмосферу — розраховується за рівнянням:

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4, \tag{2}$$

де ε — коефіцієнт випромінювання;
T_s — температура поверхні покриття, у градусах Кельвіна;

– максимальне значення короткохвильового прямого випромінення, q_s, Вт/м^2 — виміряні значення прямого короткохвильового випромінення конвертуються з метою приведення до значень, отримуваних нормально до поверхні дорожнього одягу, з урахуванням зенітного кута за найвищої точки стояння Сонця у кожен окремий день (розсіяне короткохвильове випромінення в опрацьовуваній авторами [1] математичній моделі не ураховується); значення q_s обчислюється за рівнянням[2]:

$$q_s = 1392 \cdot \alpha \cdot \tau_\alpha^{1/\cos z} \cdot \cos z, \tag{3}$$

де α — альбедо (відбивальна здатність);
τ_α — коефіцієнт пропускання повітря;
z — зенітний кут сонця, який визначається за рівнянням:

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta_s + \cos \delta_s \cdot \cosh \cdot \cos \varphi, \tag{4}$$

де φ — широта, град;
δ_s — кут схилення Сонця, град;
h — часовий кут, град;

– втрати внаслідок конвекції, q_c, Вт/м^2 — охоплюють потік випромінення, спрямований з поверхні [дорожнього одягу] в атмосферу, який утворюється переважно внаслідок різниці температур, обчислюється за рівнянням:

$$q_c = h_c \cdot \left(T_s - T_{air}\right), \tag{5}$$

де h_c — параметр, значення якого залежить від температури поверхні та швидкості вітру.

– конвекційний теплообмін q_k, Вт/м^2 — охоплює потік випромінення з поверхні асфальтобетонного покриття вглибину дорожнього одягу, обчислюється за рівнянням (6):

$$q_k = k \cdot \frac{T_d - T_c}{d}, \tag{6}$$

де k — теплопровідність, Вт/(м×К); як зазначають автори [4], найбільш варіативною є величина теплопровідності асфальтобетонів у зв'язку з широким діапазоном варіювання термічних властивостей заповнювачів;
T_d — температура на відстані від поверхні d, у градусах Кельвіна;
d — відстань від поверхні, м.

[2] Номограму для визначання кутових величин для Північної півкулі, згідно з інформацією розробників вихідної теорії, наведено в роботі [4]; також з алгоритмом відповідних розрахунків, застосованих для об'єкта на території Східної півкулі, можна ознайомитися в роботі [1].

Потрібно зазначити, що автори [1], в розвиток теорії [4], виконували розрахунок теплообміну з урахуванням температурного режиму [земляного полотна та] ґрунтів і для верифікації застосовували метод скінченно-різницевої апроксимації результатів розрахунків за рівнянням теплообміну; моделювання процесів теплообміну виконували з виокремленням модельних елементів варійованих розмірів (збільшення розміру з віддаленням від поверхні), де кожному модельному елементу привласнювалися певні значення температури, пористості та водонасичення — варійованим з цих параметрів приймалася температура. Розрахунок теплообміну з виокремленням модельних елементів здійснювався до глибини 5 м — було прийнято, що для глибше розташованих шарів ґрунту температурний режим є постійним.

Досягнення максимальної температури асфальтобетонного покриття супроводжується встановленням температурної рівноваги, відповідно до чого сума значень перелічених вище складників балансу потоків випромінення, або q_{net}, дорівнює нулю (рівняння (7)):

$$q_{\alpha} + q_{s} - q_{r} - q_{c} - q_{k} = 0. \quad (7)$$

Підставляючи значення перемінних у рівняння (7), отримують рівняння для виведення максимальних значень літньої температури покриття; поряд з цим, автори [4] вказують, що прогнозування максимальної літньої температури покриття потрібно виконувати для глибини 20 см, оскільки температурний режим на глибині 20 см найбільш вагомо впливає на функціонування асфальтобетонного покриття.

Згідно з даними [4], теоретичні та польові дослідження показали достатню точність математичних моделей прогнозування максимальних літніх температур асфальтобетонного покриття на підставі теорії теплової дифузії; коефіцієнти кореляції розрахункових значень температур, обчислених для різних об'єктів відповідно до описаної вище моделі, становили від 0,82 до 0,91, при цьому для 83 % результатів відхили розрахункових значень максимальних температур покриття від відповідних фактичних значень не перевищували 3 °С, та для 96 % — 4 °С.

Поряд з цим, автори [1] за результатами моделювання максимальної літньої температури покриття (об'єкт розташований орієнтовно на 59° п. ш. та 16° с. д.) із застосуванням описаної вище математичної моделі надали висновок, що питання стосовно встановлення температурної рівноваги за максимальної температури покриття є спірним — за певних умов процес встановлення температурної рівноваги може тривати та призводити до подальшого підвищення температури покриття. Одним з критичних метеорологічних чинників було зазначено швидкість вітру та було показано, що у разі безвітряної погоди за інших рівних умов максимальна температура покриття може перевищувати таке значення, набуте за певної швидкості вітру (до розрахунку приймалася швидкість 4,5 м/с), на 30 °С — на європейській території на високих широтах з урахуванням метеорологічних даних 1990-х рр. за певної сукупності метеорологічних чинників максимальна температура асфальтобетонного покриття, згідно розрахунку, могла наближуватися до значень 100 °С. Потрібно зазначити, що автори [1] стверджують, що температурна рівновага в асфальтобетонному покритті та швидкість вітру, наприклад, 4,5 м/с взагалі є взаємовиключними явищами.

Елементи описаної вище теорії термічної дифузії було застосовано авторами [3] для прогнозування температур асфальтобетонного покриття впродовж перехідного, за погодно-кліматичними умовами, періоду (протягом чотирьох найбільш холодних місяців року, з грудня включно) з допомогою *3D FEM* моделі (3*D* — моделювання методом скінченних елементів); об'єкт розташований орієнтовно на 41° п. ш. та 6° з. д. Були прийняті такі основні правила побудови моделі: ближче до поверхні модельного покриття, а також до зони навантаження від колеса транспортного засобу розмір модельних елементів приймався меншим у зв'язку з більш високим

градієнтом напружень; будова моделі передбачала її симетрію, що дозволило виконувати власне моделювання та розрахунки для однієї геометричної половини тривимірної моделі. На відміну від роботи [1] було прийнято, що температурний режим є постійним для шару ґрунту, розташованого нижче відмітки 2 м. До розрахунку, з метою підтвердження достовірності моделювання, приймали дані погодинної реєстрації метеорологічних чинників. Термопари для вимірювання температури асфальтобетонного покриття були розміщені на сімох рівнях від поверхні покриття до нижньої крайки (товщина шару асфальтобетону 340 мм). Автори [3] надали висновок, що найбільш точними є результати розрахунків, віднесені до найбільш холодних місяців, також відносно вищу точність мають результати розрахунків для точок, наближених до поверхні покриття, де середня похибка[3] для всього масиву даних була меншою ніж 2,1 °С; найбільшу похибку у 4 °С (див. прим. [3]) дають розрахунки на найбільшій глибині для найбільш теплого місяця.

Описану вище модель, точність якої для прогнозування температур асфальтобетонного покриття було підтверджено, застосовано тим же авторським колективом для моделювання процесів утворення й розвитку відображених тріщин, де одним з основних чинників прийнято напруження розтягу, що виникають в «шарі перекриття» (*overlay*) — новому шарі асфальтобетону — над тріщинами «старого» покриття у разі механічного навантаження від коліс транспортного засобу за умов зниження температури [5]. Вихідними даними для моделювання температурних навантажень було прийнято адаптовані значення температур асфальтобетонного покриття 0 °С, 10 °С та 20 °С (однакові для шару перекриття і «старого» шару асфальтобетону) та від'ємний градієнт (зниження температур, адаптовані значення) 5 °С, 15 °С, 30 °С; значення зниження температури шару перекриття ΔT_{ovl} та шару старого покриття ΔT_{bet} приймалися різними; моделювання виконували для розрахункового навантаження на вісь транспортного засобу 130 кН. Одним з важливих результатів роботи [5] є надання висновку, що температурні навантаження мають більш виявлений негативний вплив на строк служби відремонтованого покриття, ніж механічні навантаження; чим нижчими є температури покриття, тим більш виявленим є негативний вплив температурних навантажень (**рис. 1**).

Конструкція нежорсткого дорожнього одягу, щодо якої наведено результати моделювання на **рис. 1**, складається з неукріпленого шару основи з дисперсних сумішей товщиною 30 см, шару «старого» асфальтобетонного покриття товщиною 25 см, та шару перекриття товщиною 10 см. Як свідчать дані **рис. 1**, на розвиток відображених тріщин (як критерій зниження строку служби шару перекриття) більш негативно впливають умови, коли температура «старого» асфальтобетонного покриття є нижчою за температуру шару перекриття — тобто зниження температури шару перекриття у даному випадку буде мати позитивний вплив [5].

Як зазначають автори [5], ризик утворення відображених тріщин є значним в регіонах з суттєвими добовими перепадами температур або з екстремально низькими температурами.

Порядок розрахунку температурного режиму асфальтобетонного покриття та його впливу на напружено-деформований стан конструкції нежорсткого дорожнього одягу описано в [6]. Наведений алгоритм розрахунку температурного режиму також базується на балансі потоків випромінення (баланс теплових потоків, радіаційний баланс). Метою математичного моделювання згідно з [6] є розрахунок теплових потоків, що надходять та виходять з поверхні конструкції дорожнього одягу (здійснюється в двовимірній декартовій системі координат), розрахунок зміни жорсткості (модуля пружності) асфальтобетонного шару — з приведенням до модуля конструкції дорожнього одягу — внаслідок різниці температурних полів, та розрахунок температурних напружень в асфальтобетонному покритті.

[3] За похибку визначання температури прийнято абсолютну різницю розрахункових і відповідних фактичних значень температури.

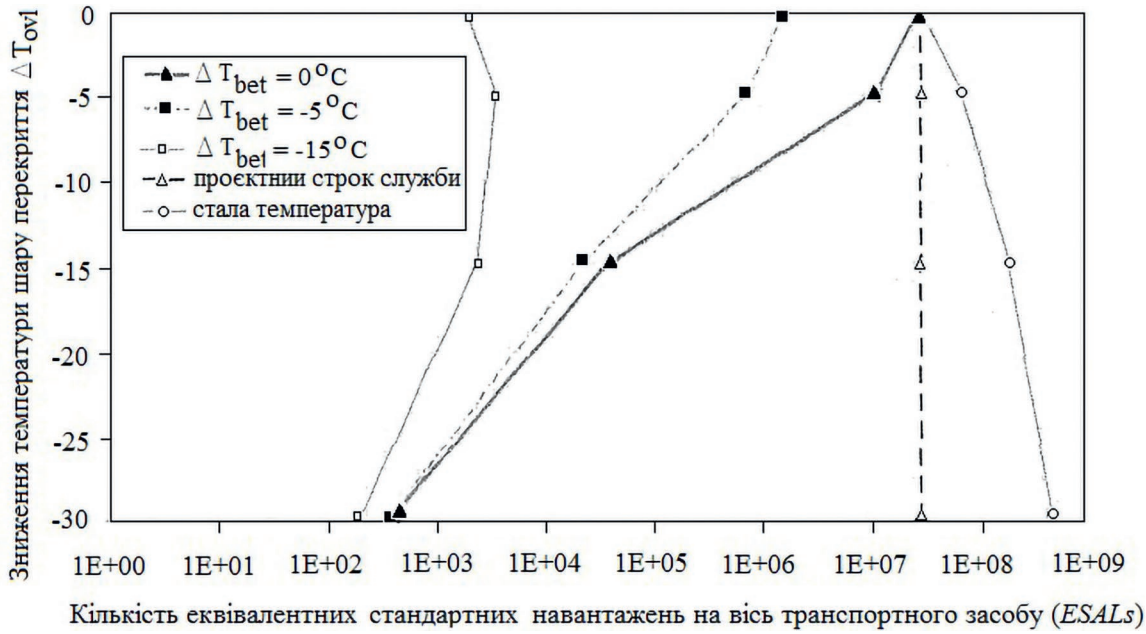

Рисунок 1 — Залежність строку служби нового шару асфальтобетону (шару покриття), укладеного на тріщинувате асфальтобетонне покриття, від навантажень за вихідної температури шарів асфальтобетону 20 °C

Рекомендована у [6] математична модель розрахунків теплового режиму не передбачає варіацію розмірів модельних елементів зі зміною градієнту значень чинників впливу. Також стверджується, що конструкція дорожнього одягу у теплофізичному розумінні є твердим тілом, яке через верхню граничну поверхню знаходиться у тепловому контакті з оточуючим середовищем, а нижня поверхня є нескінченою; нульову температурну амплітуду ґрунтів прийнято на глибині 10 м. Модель [6] не описує урахування сталого температурного режиму ґрунтів та, відповідно, не внесено умову обмеження геометричних розмірів моделі (або кількості модельних елементів).

Висновки

Широко впроваджені в світовій практиці дорожнього будівництва системи проєктування нежорсткого дорожнього одягу оперують розрахунковими значеннями температур асфальтобетонного покриття, яких може бути досягнуто за критичного впливу метеорологічних чинників.

Залежно від вирішуваної проблеми проєктування (нове будівництво, ремонти, реконструкція тощо) у частині температур покриття вихідними даними можуть бути, наприклад, екстремальні значення або градієнт температур покриття.

Прогнозування температур асфальтобетонного покриття і розрахунок температурних режимів дорожнього одягу здійснюють на підставі балансу потоків випромінення. За певної сукупності метеорологічних чинників розрахункові значення максимальних температур асфальтобетонного покриття можуть бути суттєво перевищені внаслідок особливостей процесу встановлення температурної рівноваги в покритті.

Розрахункові критичні значення температур асфальтобетонного покриття дозволяють більш ефективно — порівняно із середніми значеннями, отриманими за результатами

спостережень — прогнозувати відклик конструкції нежорсткого дорожнього одягу на вплив навантажень. Ефективними в прогнозуванні температур асфальтобетонного покриття і розрахунку температурних режимів дорожнього одягу є багаторівневі тривимірні математичні моделі, де розмір модельного елемента варіюється залежно від величини градієнта критичного чинника.

На температуру покриття суттєво впливає температура розташованих нижче шарів дорожнього одягу та земляного полотна/ґрунтів, які є масивним джерелом випромінення або поглинання енергії. Побудова моделі має ураховувати сталий (за умов проєктування) температурний режим ґрунтів з відповідним обмеженням розмірів моделі та кількості модельних елементів.

Список літератури

1. Hermansson, A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1699, Issue 1. Jan 2000, P. 134–141. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1699-19 (дата звернення: 16.02.2023).

2. Minhoto, M. J. C., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Picado-Santos, L. G. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1919, Issue 1. 2005. P. 96 –110. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0361198105191900111 (дата звернення: 13.12.2022).

3. Довідник № 5. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для розрахунку нежорсткого дорожнього одягу. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ). Київ, 2019. 88 с. (Інформація та документація).

4. Solaimanian, M., Kennedy, T. W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1417, P. 1–11. URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1417/1417-001.pdf (дата звернення: 08.02.2023).

5. Minhoto, M. J. C., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Picado-Santos, L. G. Low-temperature influence in the predicted pavement overlay life. Asphalt rubber 2003 Conference, Brasilia, Brasil, 2003, P. 167–180. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1809-23 (дата звернення: 09.02.2023).

6. Р В.2.3-21476215-803:2012. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в асфальтобетонних покриттях конструкцій нежорстких дорожніх одягів. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), Національний транспортний університет (НТУ). Київ, 2012. (Інформація та документація).

References

1. Hermansson, A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1699, Issue 1. Jan 2000, P. 134–141. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1699-19 (Last accessed: 16.02.2023) [in English].

2. Minhoto, M. J. C., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Picado-Santos, L. G. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1919, Issue 1. Jan 2005,

P. 96–110. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0361198105191900111 (Last accessed: 13.12.2022) [in English].

3. Dovidnyk № 5. Klimatychni kharakterystyky ta klimatychne raionuvannia terytorii Ukrainy dlia rozrakhunku nezhorstkoho dorozhnoho odiahu [Handbook No. 5. Climatic characteristics and climatic zoning of the territory of Ukraine for the calculation of flexible road pavement]. State Agency of Highways of Ukraine (Ukravtodor), Kharkiv National Automobile and Road University (KHNADU). Kyiv, 2019. 88 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. Solaimanian, M., Kennedy, T. W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, Vol. 1417. P. 1–11. URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1417/1417-001.pdf (Last accessed: 08.02.2023) [in English].

5. Minhoto, M. J. C., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Picado-Santos, L. G. Low-temperature influence in the predicted pavement overlay life. Asphalt rubber 2003 Conference, Brasilia, Brasil, 2003, P. 167–180. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1809-23 (Last accessed: 09.02.2023) [in English].

6. R V.2.3-21476215-803:2012. Rekomendatsii z rozrakhunku temperaturnykh poliv i napruzhen v asfaltobetonnykh pokryttiakh konstruktsii nezhorstkykh dorozhnikh odiahiv. Derzhavne ahentstvo avtomobilnykh dorih Ukrainy (Ukravtodor), Natsionalnyi transportnyi universytet (NTU). Kyiv, 2012. (R B.2.3-21476215-803:2012. Recommendations for the design of temperature fields and stresses in asphalt pavement layers of flexible road pavement constructions. The State Agency of Automobile Roads of Ukraine (Ukravtodor), National Transport University (NTU). Kyiv, 2012. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Tetiana Tereshchenko, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

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

ASPECTS OF PREDICTION OF THE ASPHALT PAVEMENT TEMPERATURE REGIMES FOR PURPOSES OF THE FLEXIBLE PAVEMENT DESIGNING

Abstract

Introduction. The introduction to the paper describes the impact of critical temperatures and temperature loadings on the performance of the asphalt pavement layer and also on the entire flexible road pavement construction.

Problem statement. The issues of the paper concern significant aspects of the pavement temperature regimes prediction used in various systems of the flexible road pavement designing.

Purpose. The main goal of the paper is to review and compare the flexible road pavement designing approaches based on predicted temperatures of the asphalt pavement layer which may be reached under critical road pavement operating conditions.

Results. The application of the theory of thermal diffusion as the framework for the description of establishing the asphalt pavement layer temperature equilibrium was reviewed. As it is assumed, when the maximum asphalt pavement layer temperature is reached exists the equilibrium between outgoing and incoming flows such as outgoing and incoming longwave radiation, shortwave incoming radiation, convection losses and heat transfer. After wide investigations carried out by an SHR program, the maximum asphalt pavement layer temperatures calculated on that heat flows balance were proposed to be used in the flexible road pavement designing.

Also, the results of investigations carried out to develop the proposed theory of temperature equilibrium were analyzed and it was stated that under certain meteorological conditions the maximum asphalt pavement layer temperature will not be accompanied by the temperature equilibrium; the subsequent redistribution of heat flows may led to the values of temperature that significantly overcome the calculated maximum.

Further, some aspects of the prediction of temperature of the road pavement during the transitional winter/spring period performed via 3D FEM model constructed considering the thermal diffusion theory were reviewed. Similar approach to the modeling of the process of reflective cracking in an asphalt pavement overlay under temperature loads was recognized as an effective instrument to design the asphalt pavement repair strategy.

Conclusions. Systems for flexible road pavement designing implemented in the world-wide practice manage estimated values of the road pavement temperatures which can be reached under critical action of meteorological factors.

Considering the problem to be resolved, as the design input data the extreme values or gradients of the pavement temperatures shall be accepted.

The prediction of the asphalt pavement layer temperatures and also the road pavement temperature regimes calculation should be performed on the basic of the heat flows balance. The estimated maximum values of the asphalt pavement layer temperatures can be significantly overcame due to the peculiarities of the process of establishing of temperature equilibrium in the pavement.

The estimated critical values of the asphalt pavement layer temperatures allow the more effective modeling of the flexible road pavement response comparing with those performed with the mean values obtained through on-site observations.

Keywords: flexible road pavement, asphalt pavement layer, heat flows balance, pavement temperature regime modeling.