

А. М. Онищенко, А. С. Лапченко, Н. П. Чиженко
Національний транспортний університет

ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ВІД УСАДКИ В ЦЕМЕНТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

© Онищенко А. М., Лапченко А. С., Чиженко Н. П., 2019

Запропоновано математичне розв'язання визначення напружень усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг. Об'єкт дослідження – напруження усадки у цементобетонному покритті з кристалізаційною структурою при тужавінні та твердненні. Мета роботи полягає у виведенні математичної залежності, яка моделює та дає можливість оцінити розподіл напружень усадки, що виникають у цементобетонному покритті. Метод дослідження – аналітичний метод визначення напружень усадки в цементобетонному покритті з використанням положень теорії пружності. На основі теоретичного рішення виведено математичну залежність, яка моделює та дає можливість оцінити розподіл напружень усадки, що виникають у цементобетонному покритті з кристалізаційною структурою при тужавінні та твердненні. Отримане рішення дасть змогу уточнити розрахунки довговічності цементобетонного шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою.

Ключові слова: дорожнє покриття, цементобетон, вологопровідність, цементобетонне покриття, коефіцієнт усадки, масообмін, міра жолоблення, напруження усадки, теоретичне рішення, цементовмісний шар.

A. N. Onyshchenko, A. S. Lapchenko, N. P. Chyzenko
National Transport University

EVALUATION OF CONTRACTION STRESS IN CEMENT CONCRETE OF ROAD PAVEMENT

© Onyshchenko A. N., Lapchenko A. S., Chyzenko N. P., 2019

The mathematical solution for determining the contraction stresses in the cement-concrete or other cemented layers of road clothing is proposed in the article. The cracks in the cement containing materials may result from various factors: a discrepancy of thermal coefficient of linear expansion; cement heat output; inner stresses in structure of cement rock or in contact point “cement rock – filling aggregate”; improper care for arranged layer, constant heat and mass transfer (steam, water fluid phase) resulting in a temperature and moisture contrasts through thickness; shrinkage caused by physical and chemical processes when hardening of cement rock; traffic loads strain. In order to calculate the cement concrete layers of road clothing for crack resistance or how it's indicated in CC B.2.3-37641918-557:2016 “Rigid road clothing” – “6.1.3 Calculation of solid cement and concrete surface” it's required to know a stress value from effect of above factors. It's possible to define the stress in cement and concrete layers from traffic loads and temperature difference using CC B.2.3-37641918-557:2016 “Rigid road clothing”, herewith the stress calculation from shrinkage at the moment of setting and hardening is ignored at all that maybe evidenced about lack of such calculation. However as practice shows a shrinkage stress in cement and concrete as well as other cement containing layers of the road clothing with crystallization structure reaches a value of traffic stress and temperature difference. That's why it may become necessity in

stress definition in cement containing materials with crystallization structure at the stage of setting and hardening until “traditional” 28 days. The object of study – contraction stresses of cement-concrete pavement layer of road clothing with a crystallization structure for setting and hardening. The aim of the work is to derive a mathematical dependence that simulates and makes it possible to estimate the distribution of contraction stresses that occur in a cement-concrete layer of road clothing. On the basis of the theoretical solution, a mathematical dependence is derived that simulates and makes it possible to estimate the distribution of contraction stresses that arise in a cement concrete or other cemented layers with a crystallization structure for setting and hardening. The theoretical solution is based on the theory of resilience. The obtained solution will make it possible to clarify the calculations of the durability of the cement concrete or other cemented layers with a crystallization structure.

Key words: road pavement, cement concrete, moisture conductivity, contraction coefficient, mass transfer, measure of warping, contraction stress, theoretical solution, cemented layer.

Вступ. Зростання вантажопідйомності і швидкості руху автомобілів потребує безперервного розвитку дорожньої мережі, вдосконалення конструкцій дорожнього одягу. Невідповідність стану автомобільної дороги вимогам транспортного потоку призводить до зростання кількості дорожньо – транспортних пригод, зниження швидкості руху, збільшення зносу автомобілів і витрат на їх ремонт, підвищення витрат палива. Частковим рішенням цієї проблеми може стати використання жорсткого дорожнього одягу.

Міжнародна інженерно-дизайнерська компанія ARUP прогнозує, що кількість машин на дорогах світу щорічно збільшуватиметься на 3 %, більшість автомобілів буде рухатись по міських дорогах. З огляду на це зміниться дорожня інфраструктура, підходи до будівництва доріг. UIF прогнозує значне збільшення автобанів та магістралей із використанням цементобетонних технологій внаслідок урбанізації. Зростання частки цементобетонних доріг в ЄС до рівня 50–60 %, в США – до рівня 70 – 90 %. Проте за останніми даними Міністерства інфраструктури України на частку доріг загального користування з цементобетону припадає менш ніж 3 % від загальної кількості доріг, що становить 2900 км [1].

14 листопада 2017 року у Комітеті з питань транспорту ВР України відбулося засідання круглого столу “Бетонні дороги. Реальність для України”, під час якого порівнювали за ефективністю цементобетонні і асфальтобетонні дороги і показали економічні переваги будівництва цементобетонних доріг: запас виробничих потужностей цементної промисловості становить 32,6 % і в змозі забезпечити будівництво цементобетонних доріг в будь-якому регіоні України; значний вплив на ВВП України завдяки використанню місцевих сировинних матеріалів, що дасть змогу відмовитися від імпорту та надати робочі місця населенню. За оцінками UIF, при будівництві 1000 км на рік цементобетонні дороги можуть забезпечити зростання ВВП до 2030 року від 8,5 до 19,4 млрд. дол. Через 20 років ефект становитиме до 31 млрд. дол. зростання ВВП; економія коштів і матеріалів при експлуатації та ремонті дороги, зниження циклу обслуговування; економія палива для вантажних та легкових транспортних засобів завдяки низькому опору кочення (від 35 до 305 млн. грн. на рік); економія електроенергії для освітлення тунелів і доріг завдяки кращій здатності цементобетону відбивати світло; зменшення собівартості продукції дасть змогу підвищити конкурентну спроможність національних продуктів на світовому ринку.

Враховуючи життєвий цикл доріг та їхній термін експлуатації, цементобетонні дороги є міцнішими та більш довговічними. Відповідно, у довгостроковій перспективі (20 років) витрати на будівництво асфальтобетонної доріг передбачатимуть 2 капітальні ремонти, тоді як будівництво цементобетонної дороги – 1 капітальний ремонт (або його зовсім не буде за 25-річного терміну) [2].

Тож незважаючи на малу протяжність цементобетонних доріг, нинішнім “трендом” стає вибір саме такого типу покриття, особливо в південних регіонах нашої держави. Крім цементобетону, в покритті і шарах дорожнього одягу використовують інші матеріали із кристалізаційною

структурою [3–7]: щебеневі, щебенево-піщані, гравійно-піщані (і навпаки) матеріали, що укріплені неорганічними в'язучими, пісні бетони та інші. Маючи низку техніко-економічних переваг, шари з цементобетону та інших цементовмісних матеріалів кристалізаційної структури внаслідок підвищеної жорсткості схильні до тріщиноутворення, що знижує їхню міцність і довговічність загалом.

Огляд наукових джерел і публікацій. Тріщини в цементовмісних матеріалах можуть виникати через різні фактори [4–8]: різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення; тепловиділення цементу; внутрішні напруження в структурі цементного каменю чи в зоні контакту “цементний камінь – заповнювач”; неналежний догляд за влаштованим шаром; постійний тепло- і масообмін (водяний пар, рідка фаза води), що спричиняє нерівномірний розподіл температури і вологості по товщині; усадка за дії фізико-хімічних процесів при твердненні цементного каменю; деформації від транспортних навантажень.

Усадка і набухання цементобетону за зміни вологості є основною причиною нестійкості до повітряного середовища. Тверднення бетону на повітрі спричиняє, як правило, усадку, а у воді – набухання. Усадка тверднучого цементного каменю і бетону є наслідком виведення води із системи, висихання (за відсутності гігрометричної рівноваги із навколишнім середовищем), що приводить до зменшення її об'єму.

Усадку цементобетону спричиняють фізико-хімічні й капілярні явища, що відбуваються в гелієвій складовій цементного каменю й зумовлені зміною вологовмісту в цементобетоні. Зволожені конструкції висихають за рахунок градієнтів температури й вологості між конструкцією й середовищем експлуатації. У міру проходження циклів зволоження й висушування нарощуються залишкові деформації, які можна визначити як утому. Абсолютна величина початкової усадки залежить від складу цементобетонної суміші та властивостей сировинних матеріалів. Жорсткі суміші мають менші величини початкової усадки, ніж рухливі та тим паче литі. Основна частина усадкових деформацій припадає на перші три-чотири місяці тверднення, повна стабілізація настає через один–два роки [10]. Усадка й усадкові напруження в цементобетоні найнебезпечніші в ранньому віці. Свіжовлаштована бетонна суміш за дії сухого повітря, сонця й вітру інтенсивно випаровує вологу, що спричиняє зменшення обсягу й ускладнює процес твердіння й формування структури. Виникають внутрішні усадкові напруження, які погано компенсуються ще маломіцним бетоном. У цей період на поверхні виробів з'являються усадкові тріщини. Зовнішні знакозмінні деформації від зволоження й висушування спричиняють ріст пошкодження цементобетону й нагромадження внутрішніх дефектів і під час подальшої експлуатації конструкції.

Розрізняють усадку внаслідок усадки свіжовлаштованої бетонної суміші внаслідок седиментації і випаровування води з поверхні конструкції (пластична усадка); зменшення об'єму внаслідок гідратації (хімічна усадка); так зване самовисушування бетону за низьких значень водоцементного відношення (аутогенна усадка); втрата води тверднучого цементобетону у середовищі із недостатньою вологістю (вологісна усадка). Вологісна усадка матеріалів як капілярно-пористих тіл пов'язана з тиском меніска рідини в капілярі на стінки капіляра, тобто в тріщині меніск рідини тисне на береги тріщин, збільшуючи ширину їх розкриття. В тріщині при її заповненні водою реалізується “ефект Ребіндера”, пов'язаний із адсорбційним зниженням міцності.

Згідно із дослідженнями О. Є. Шейкіна [19], деформація усадки залежить від трьох груп факторів: рецептурно-технологічних (вид і мінералогічний склад цементу, тонина його помелу, водоцементне співвідношення цементобетону, склад і умови тверднення цементобетону; вміст, модуль пружності і пористість заповнювачів, наявності добавок тощо), геометричних параметрів конструкції, параметрів зовнішнього середовища (температура, відносна вологість, швидкість руху повітря).

Для розрахунку цементобетонних шарів дорожнього одягу на тріщиностійкість або, як записано в ГБН В.2.3-37641918-557:2016 “Дорожній одяг жорсткий” [9] – “6.1.3 Розрахунок монолітного цементобетонного покриття”, необхідно знати величину напружень від дії вищеперерахованих факторів. Визначити напруження в цементобетонних шарах від транспортних

навантажень і перепаду температур можна за ГБН В.2.3-37641918-557:2016 “Дорожній одяг жорсткий” [9], при цьому розрахунок напружень від усадки в момент тужавіння та тверднення не враховується взагалі, що може свідчити про відсутність такого розрахунку. Однак, як показує практика, дуже часто напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу з кристалізаційною структурою досягають величини напруження від дії транспорту і перепаду температур. Саме тому виникла потреба у визначенні напружень у цементовмісних матеріалах із кристалізаційною структурою на стадії тужавіння до досягнення “традиційних” 28 діб.

Мета та завдання дослідження полягає у виведенні математичної залежності, яка моделює та дає можливість оцінити розподіл напружень усадки, що виникають у цементобетонному шарі дорожнього одягу.

Теоретичні дослідження. Для детального процесу дослідження усадки цементовмісних матеріалів із кристалізаційною структурою величину усадки ділять на частину, що зумовлена випаровуванням вологи і частину, зумовлену процесами тверднення [9]. Для спрощення розрахунків об’єднаємо ці процеси в один.

За нерівномірного розподілу вологи $W(z, t)$ за товщиною h цементовмісного матеріалу із кристалізаційною структурою в ньому виникають пружні напруження $\sigma_w(z, W)$, що описуються формулою:

$$\sigma_w(z, W) = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \left[W(z, t) - \frac{1}{h} \cdot \int_0^h W(z, t) dz - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z\right)}{h^3} \cdot \int_0^h W(z, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \right], \quad (1)$$

де $\sigma_w(z, W)$ – пружні напруження, МПа; z – поточна координата за товщиною шару, м; t – час догляду, год; h – товщина шару, м; C_x – коефіцієнт міри жолоблення; α – коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи; E – модуль пружності, МПа; μ – коефіцієнт Пуассона; $W(z, t)$ – функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

Формула (1) аналогічна до формули акад. С. П. Тимошенка [11] для визначення температурних напружень в бетонних покриттях, тільки замість розрахункової функції розподілення температури по товщині покриття або шару дорожнього одягу використовують функцію розподілу вологи.

Поле вологості цементобетонного або іншого цементовмісного шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою формується за дії випаровування води за рахунок температури і вітру, фізико-хімічних процесів гідратації і гідролізу води з цементом, а також можливою втратою води з цементобетонної суміші через нижче розташований шар або ґрунт земляного полотна:

$$W(z, t) = \frac{z \cdot t \cdot (m - m_1)}{h} - m \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ [m - m_1 \cdot (-1)^n] \cdot \left[1 - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right] \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right\} + W_n, \quad (2)$$

де m – коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на верхній поверхні шару цементобетону від температури та швидкості вітру, %/год; m_1 – коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на нижній поверхні шару цементобетону, %/год; a_1 – коефіцієнт вологопровідності, м²/год; W_n – початкова вологість, %.

Для виразу (2) граничними умовами слугують такі рівняння:

$$W(z, 0) = W_n = \text{const}; \quad W(0, t) = W_n - m \cdot t; \quad W(h, t) = W_n - m_1 \cdot t. \quad (3)$$

Підставляючи рівняння (2) до рівняння (1), функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону стає підінтегральним виразом. Для другої складової виразу у квадратних дужках рівняння (1) функція розподілу вологи по товщині шару набуде вигляду:

$$\int_0^h W(z,t) dz = \frac{t \cdot (m - m_1)}{h} \cdot \int_0^h z dz - m \cdot t \cdot \int_0^h dz + W_n \cdot \int_0^h dz + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ m \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz \right\}. \quad (4)$$

Підінтегральна функція синуса матиме вигляд:

$$\int_0^h \sin \left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right) dz = - \left. \frac{h \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right)}{\pi \cdot n} \right|_0^h = - \frac{h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + \frac{h}{\pi \cdot n} = \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n}, \quad (5)$$

Для третьої складової виразу у квадратних дужках рівняння (1) функція розподілу вологи по товщині шару набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \int_0^h W(z,t) \cdot \frac{h}{2} dz &= \frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{4} - \frac{h^2 \cdot m \cdot t}{2} + \frac{h^2 \cdot W \cdot n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h^3}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \\ &\left\{ \frac{m \cdot (h - h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{\pi \cdot n} - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \right. \\ &\left. \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} \right\}, \quad (6) \\ -1 \cdot \int_0^h W(z,t) \cdot z dz &= - \frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{3} + \frac{m \cdot t \cdot h^2}{2} - \frac{W_n \cdot h^2}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times \\ &\times \left\{ \frac{m \cdot h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \right. \\ &\left. \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} + \right. \\ &\left. + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

Враховуючи тільки першу і другу складові виразу, у квадратних дужках рівняння (1) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка не може коробитися. При врахуванні всіх трьох складових виразу у квадратних дужках рівняння (1) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка може коробитися.

Підставляючи формули (4)–(7) до (1), без врахування третьої складової виразу у квадратних дужках, можемо визначити напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердненні без можливості коробитися:

$$\begin{aligned} \sigma_w(z,W) &= \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{z}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\ &\cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right), \quad (8)$$

Підставляючи формули (4–7) до (1), можемо визначити напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердненні з можливістю коробитися [12]:

$$\begin{aligned} \sigma_w(z, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{z}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\ & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \\ & \cdot \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \right. \\ & \cdot \left. \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Якщо в формулі (9) C_x дорівнює одиниці, то це означає відсутність короблення в цементобетонному шарі дорожнього одягу, і формула (9) автоматично перетворюється на формулу (8).

Висновки. На основі теоретичного рішення можна розраховувати напруження від усадки, що виникають у цементобетонному шарі дорожнього одягу із кристалізаційною структурою при тужавінні та твердненні. Рішення базується на теорії пружності і враховує такі параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і спричиняє нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення. Отримані залежності (8, 9) дають змогу розрахувати напруження від усадки на будь-якій глибині шару і в будь-який момент часу догляду за цим шаром, а надалі уточнити розрахунки довговічності цементобетонного шару дорожнього одягу із кристалізаційною структурою.

1. Розподіл доріг загального користування за типами покриттів. Міністерство інфраструктури України. <https://mtu.gov.ua/content/tehnichniy-stan-avtomobilnih-dorig-avtomobilnih-dorig-zagalnogo-vikoristannya.html>. 2. Переваги цементобетонних доріг в Україні. Економічна оцінка [Електронний ресурс] Доступно з http://www.ukrcement.com.ua/zakhodi/icalrepeat.detail/2017/11/14/48/-/kruhlyi-stil-na-temu-betonni-dorohy-realnist-dlia-ukrainy-pid-holovuvanniam-pershoho-zastupnyka-holovy-komitetu-z-pytan-transport-vasiunyka-iv-za-uch.html?published_fv=-1. 3. Шари дорожнього одягу з кам'яних матеріалів, відходів промисловості і ґрунтів, укріплених цементом: ГБН В.2.3-37641918-554:2013 (ВБН В.2.3-218-002-95). – [Чинний від 2013-11-01]. – К.: Укравтодор, 2013. – 43 с. – (Нормативний документ Укравтодору). 4. Толмачов Д. С. Розрахунок імовірності утворення температурних тріщин у монолітних дорожніх бетонах / Д. С. Толмачов, В. П. Сопов, С. М. Толмачов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – Вип. 66. – С. 113–117. 5. Солодкий С. Й. Оцінювання термонапруженого стану дорожніх покриттів на ранніх стадіях тверднення цементного бетону / С. Й. Солодкий, Р. Я. Лівша // Автошляховик України. – 2015. – № 1 – 2. – С. 71–74. 6. Котов Д. С. Деформації усадки бетону, модифіцированого хімічними і тонкодисперсними мінеральними наповнителями / Ко-

тов Д. С. // *Инженерно-строительный журнал*. – 2009. – № 7. – С. 11–21. 7. Дворкін Л. Й. Бетони і будівельні розчини: Підручник / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2008. – 448 с. 8. EN 1992-1-1: 2005-10 Eurocodez “Desing of concrete structures. Part 1: General rules and rules for building”. – *Commition of European Communities*. – 248 p. 9. Дорожній одяг жорсткий: ГБН В.2.3-37641918-557:2016 (ВБН В 2.3-218-008-97). – [Чинний від 2017-04-01]. – К.: Міністерство інфраструктури України, 2016. – 70 с. – (Нормативний документ галузі). 10. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник. – Вид. 2-ге, допов. і переробл. – К.: Основа, 2016. – 568 с. 11. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки [Пер. с англ. В. И. Контовта под редакцией Г. С. Шапиро] / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Гос. изд-во физ-мат. лит, 1963. – 635 с. 12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір “Напруження усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні”, № 85058 від 31.01.2019 р. (Онищенко А. М., Лапченко А. С., Чиженко Н. П.).

References

1. Rozpodil dorig zagalnogo koristuvannya za tyпами pokrittiv. Ministerstvo Infrastrukturi Ukrayiny [Distribution of roads of general use by types of coatings. Ministry of Infrastructure of Ukraine] available at: <https://mtu.gov.ua/content/tehnichniy-stan-avtomobilnih-dorig-avtomobilnih-dorig-zagalnogo-vikoristannya.html>. [in Ukrainian].
2. Perevagi tsementobetonnih dorig v Ukrayii. Ekonomichna otsinka [Benefits of cement-concrete roads in Ukraine. Economic appraisal] available at: http://www.ukrcement.com.ua/zakhodi/icalrepeat.detail/2017/11/14/48-/kruhlyi-stil-na-temu-betonni-dorohy-realnist-dlia-ukrainy-pid-holovuvanniam-pershoho-zastupnyka-holovy-komitetu-z-pytan-transport-vasiunyka-iv-za-uch.html?published_fv=-1. [in Ukrainian].
3. Shari dorozhnogo odyagu z kam'yanih materialiv, vidhodiv promislivosti i Gruntiv, ukriplenih tsementom: GBN V.2.3-37641918-554:2013 (VBN V.2.3-218-002-95) Chinniy vid 2013-11-01 [Layers of road clothes made of stone materials, industrial waste and soil, reinforced with cement: GBN B.2.3-37641918-554: 2013 (VBN B.2.3-218-002-95) Effective from 11/11/2013], Ukraine, 2013. – 43 p. – (Normative document in Ukraine).
4. Tolmachov D. S., Sopov V. P., Tolmachov S. M. (2017), Rozrahnok ImovirnostI utvorenniya temperaturnih trischin u monolitnih dorozhnih betonah. [Calculation of the probability of formation of temperature cracks in monolithic road concrete], *Visnik Odeskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi*, No. 66, pp. 5–9. [in Ukrainian].
5. Solodkiy S. Y., Livsha R. Ya. (2015), Otsinyuvannya termonapruzenogo stanu dorozhnih pokrittiv na rannih stadiyah tverdnennya tsementnogo betonu. [Estimation of the thermo-stressed condition of road coverings in the early stages of cement concrete hardening], *Avtoshlyahovik Ukrayini*, No. 1, pp. 71–74. [in Ukrainian].
6. Kotov D. S. (2009), Deformatsii usadki betona, modifitsirovannogo himicheskimi i tonkodispersnyimi mineralnyimi napolnitelyami. [Shrinkage deformation of concrete modified with chemical and fine mineral fillers], *Inzhenerno-stroitelnyiy zhurnal*, No. 7, pp. 11–21. [in Ukrainian].
7. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L. (2008), *Betoni i budivelni rozchini: pidruchnik* [Concrete and building solutions: Textbook], Kiev, 448 p. [in Ukrainian].
8. EN 1992-1-1: 2005-10 Eurocodez “Desing of concrete structures. Part 1: General rules and rules for building”, *Commition of European Communities*, 248 p.
9. Dorozhniy odyag zhorstkiy: GBN V.2.3-37641918-557:2016 (VBN V 2.3-218-008-97), (2017), [Road clothes are rigid: GBN V.2.3-37641918-557: 2016 (VBN V 2.3-218-008-97)], *Ministerstvo Infrastrukturi Ukrayini*, pp. 70. [in Ukrainian].
10. Gots V. I., Pavlyuk V. V., Shilyuk P. S. (2016), *Betoni i budivelni rozchini: pidruchnik*. [Concrete and building solutions: textbook], Kiev, 568 p. [in Ukrainian].
11. Timoshenko S. P. (1963), *Plastinki i obolochki: pidruchnik* [Plates and Shells: textbook], 635 p. [in Ukrainian].
12. Onyschenko A. M., Lapchenko A. S., Chyzenko N. P. (2019), Svidotstvo pro reestratsiyu avtorskogo prava na tvir “Napruzhennya usadki v tsementobetonnih ta inshih tsementovmisnih sharah dorozhnogo odyagu pri tuzhavinni ta tverdinni”, “intensification of shrinkage in cement concrete and other cement balls of road building at hardness and hardness”: certificate about copyright law on the article], No. 85058. [in Ukrainian].