

Ключевые слова: автоматизация геодезических работ, геодезические программы, специализированные программные продукты, программа CREDO, программа AutoCAD Civil 3D, AutoCAD Map 3D.

Arsenieva N. THE GEODETIC PROGRAMS ANALYSIS FOR DATA PROCESSING AT RESEARCHES AND DESIGN OF HIGHWAYS. The use of computer-aided engineering allows to process the large volume of information practically in all sectors of road design (engineer-geodesic, engineer-geological etc.). CAD forms the

information space in which is reflected a large number of initial data for designing future highway. The considered software products allow to automatize the processes of generation, transformation and transmission of information in electronic form, and to justify the need for automation of geodetic surveys in the highway design.

Keywords: program computer-aided engineering of geodesic works, geodetic programs, specialized software products, program CREDO, program AutoCAD Civil 3D, AutoCAD Map 3D.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-94-4-110-116

УДК 625.72

Батракова А.Г., Урдзік С.М.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна; e-mail: rp@khadi.kharkov.ua;
orcid.org/0000-0002-4067-4371)*

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗАХОДІВ ЩОДО ПОСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ З ПІДПОВЕРХНЕВИМИ ТРІЩИНАМИ

Метою роботи є моделювання напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій дорожніх одягів (КДО) з підповерхневими тріщинами при розробленні проектних рішень з ремонту і посиленню дорожніх одягів, що знаходяться в експлуатації. Розроблено моделі конструкцій дорожніх одягів з підповерхневими тріщинами, які дозволяють здійснити розрахунки ключових параметрів напружено-деформованого стану при чисельному моделюванні заходів щодо посилення конструкцій дорожніх одягів.

Ключові слова: підповерхневі тріщини, напружено-деформований стан, конструкція дорожнього одягу, напруження, ремонтні заходи.

Вступ. У дорожній галузі, для якої характерні значні обсяги як матеріальних, так й трудових затрат, завдання підвищення ефективності дорожніх робіт ще на етапі проектних рішень здобувають особливу значимість. Тому, автори досліджень [1] і ряду подібних робіт основну увагу зосередили на спробах оптимізації заходів з ремонту й реконструкції ділянок автомобільних доріг з врахуванням лише зовні спостережуваних факторів. У той же час питання щодо причин, що викликали необхідність передчасного ремонту, залишилися відкритими. Тріщини (різної конфігурації, гли-

бини, походження) є найбільш характерним видом руйнувань дорожніх покриттів. Основну небезпеку тріщини представляють, як початкова стадія більш небезпечних руйнувань.

Проблеми, які пов'язані із тріщинами в асфальтобетонному покритті досліджували: Б.С. Радовський [2], В.О. Золотарьов [3], В.В. Мозговий [4], І.І. Леонович [5], В.А. Веренько [6], І.П. Гамеляк [7], Л.Б. Гензенцевей [8], Н.В. Горелишев [9], В.Д. Казановський [10], А.Е. Мерзликін [11] С.К. Ліополов [12] та інші вчені [13-17].

Зі зростанням потужності ПК з'явилися роботи з моделювання поведінки дорожніх одягів з деформаціями та руйнуваннями. Завдання аналізу напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій з наскрізними тріщинами виникають у випадках відбитих тріщин у шарах асфальтобетону на жорсткій основі, при виникненні втомних тріщин у шарах нежорстких дорожніх одягів. Особлива увага цій проблемі приділяється у зв'язку зі зростаючими навантаженнями від транспортних засобів. Актуальність питання також обумовлена тим, що згідно із сучасними уявленнями, приповерхні (near-surface) тріщини є одним з домінуючих типів руйнування нежорстких покриттів. Тому основне завдання дослідники формулюють як дослідження приповерхніх напруг на неоднорідні навантаження від спарених коліс і аналіз потенціалу тріщиноутворення поблизу поверхні і поруч з місцем контакту у типових конструкціях з досить товстими шарами асфальтобетону. У якості математичного інструмента використовується узагальнений метод кінцевих елементів.

Сучасні методики, що орієнтовані на використання різних програмних комплексів [18] для розрахунків й оптимізації заходів щодо утримання, ремонту й реконструкції автомобільних доріг, припускають залучення як вихідну інформацію лише даних про спостережувані деформації та руйнування, без розкриття конструкції (у першу чергу – кількість й характер тріщин і параметрів колії). Однак, як відзначено у роботі [19], крім явних дефектів існують і так звані приховані дефекти. Приховані дефекти – дефекти, для виявлення яких у нормативній документації, обов'язкової для даного виду контролю, не передбачені відповідні правила, методи й засоби. Найбільш характерними прихованими дефектами (руйнуваннями) є тріщини у нижніх шарах покриття.

Донедавна аналіз впливу підповерхневих тріщин на характеристики конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу був відсутній у зв'язку із відсутністю засобів неруйнівного контролю, які дозволяють швидко у режимі реального часу виявляти такі руйнування. Розвиток методів георадарної діагностики [20, 21] відкриває принципові можливості для оцінки стану дорожніх одягів з підповерхневими тріщинами й обґрунтування найбільш ефективних ремонтних заходів.

Тому метою роботи є моделювання НДС конструкцій дорожніх одягів (КДО) з підповерхневими тріщинами при розробленні проектних рішень з посилення дорожніх одягів.

Методи дослідження. В основі розрахунків НДС дорожніх одягів покладено базові рівняння теорії пружності [22]. Основним методом дослідження є метод скінченних елементів (МСЕ). Через осьову симетрію завдання загальний представницький об'єм у всіх обчислювальних експериментах мав форму циліндра діаметром 3 м, висотою 1,3 м.

Для обчислень використовувалася половина об'єму з умовами на границях:

1. Нерухливе закріплення нижньої границі (fixed support):

$$\delta x_p = \delta y_p = \delta z_p = 0 \quad \text{або} \quad \delta r_p = \delta \varphi_p = \delta z_p = 0, \quad \forall p \in \{P\}, \quad (1)$$

де p – номери вузлів, що належать відповідної поверхні, на якій задається умова, $\{P\}$ – множина вузлів.

2. Ковзаюче (без тертя) закріплення (frictionless support) для плоских поверхонь (шарів конструкції) у декартової (локальної) системі координат:

$$\delta x_p = \delta y_p = 0 \quad \forall p \in \{P\}. \quad (2)$$

3. Циліндричне закріплення (cylindrical support) для завдання рухомих вузлів на циліндричних поверхнях в осесиметричних задачах:

$$\delta r_p = \delta \varphi_p = 0 \quad \forall p \in \{P\}. \quad (3)$$

У якості навантаження (від реального колеса) використаний гнучкий «штамп» діаметром $D=0,37$ м. Питомий тиск рівномірно розподіленого навантаження $P=0,6$ МПа. На даному етапі для проведення обчислювальних експериментів використовувалися моделі з п'ятьома шарами: два шари покриття товщиною відповідно 5 см і 7 см, два шари основи товщиною відповідно 20 см і 20 см, ґрунт – товщина шару 78 см.

При розробленні критеріїв оцінки поточного стану КДО за основу були прийняті існуючі нормативні документи. Тому при розрахунках обчислювалися: прогин, максимальні напруження розтягу на нижній фібрі покриття й напруження зсуву у ґрунтах основи.

Аналіз попередніх розрахунків доводить, що у складних напружено-деформованих станах, пов'язаних з наявністю сингулярності (ребер тріщин) необхідно враховувати всі складові НДС ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) або їх еквівалент $\sigma_{vonMises}$:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{0.5 \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (4)$$

де $\sigma_{vonMises}$ - еквівалентне напруження (по Мізессу), МПа; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження, МПа.

При цьому важливу роль відіграють не тільки максимальні значення напружень (деформацій) в окремих точках, але й їхня локалізація.

Попередні розрахунки для типових КДО з підповерхневими тріщинами довели, що, незважаючи на відносно малі відмінності у величині прогину (1,9 %), відмінності у величині максимальних розтягувальних напружень на нижній фібрі верхнього шару можуть відрізнятись сильніше (3,3 %). Більш значними можуть бути відмінності у величині напружень розтягу (до 239 %) і напружень зсуву (до 234 %) на верхній фібрі шару із тріщинами. Крім зміни максимальних значень відбувається й перерозподіл об'ємної локалізації цих величин.

Результати дослідження. Завдання оптимізації проектів ремонту й реконструкції з погляду теорії пружності можуть бути вирішені на основі наступних підходів: застосування конструкцій, що знижують ці навантаження (наприклад, розшивка тріщин і заповнення їх матеріалом); використання матеріалів, здатних протистояти значним навантаженням (геосинтетичних матеріалів), а також комбінацією цих підходів. Для чисельної реалізації зазначених завдань розроблені моделі КДО, що дозволяють здійснити розрахунки ключових параметрів НДС (відображені навантаження – круглий штамп, тріщини – вертикальні смуги, елементи посилення – горизонтальні смуги). Дана модель (рис. 1) є універсальною, оскільки дозволяє оцінити вплив перерахованих заходів на напружено-деформований стан КДО.

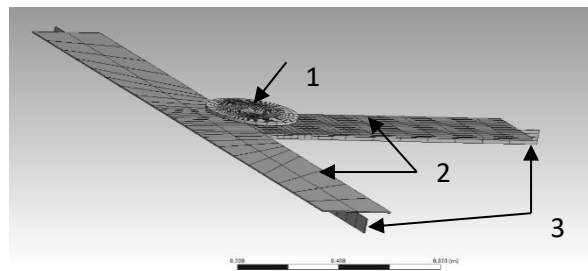


Рис. 1. Модель КДО з підповерхневими тріщинами та елементами посилення. 1 – штамп; 2 – шари посилення; 3 – тріщини

Для оцінки описаних вище підходів були проведені дослідження впливу: модуля пружності матеріалу заповнення тріщин (рис. 2), товщини шарів посилення, у тому числі з використанням геосинтетичних матеріалів, ширини розкриття тріщин, заповнених різними матеріалами.

Розрахунки дозволили встановити факт збільшення напружень розтягу при зменшенні модуля пружності матеріалу заповнення. З іншого боку, підвищення модуля пружності матеріалу заповнення призводить до виникнення значних дотичних

напружень у точках контакту матеріалу тріщини з матеріалом основного шару, що підтверджує розрахунок, виконаний для моделі посилення КДО, у тому числі з армуванням шару посилення геосинтетичними матеріалами.

При проведенні розрахунку модель № 1 складалася з одного шару посилення, модуль матеріалу заповнення тріщини 100 МПа; модель № 2 – два шари посилення сумарною товщиною 7 см; модель № 3 – два шари посилення, нижній шар посилення армований геосинтетичним матеріалом.

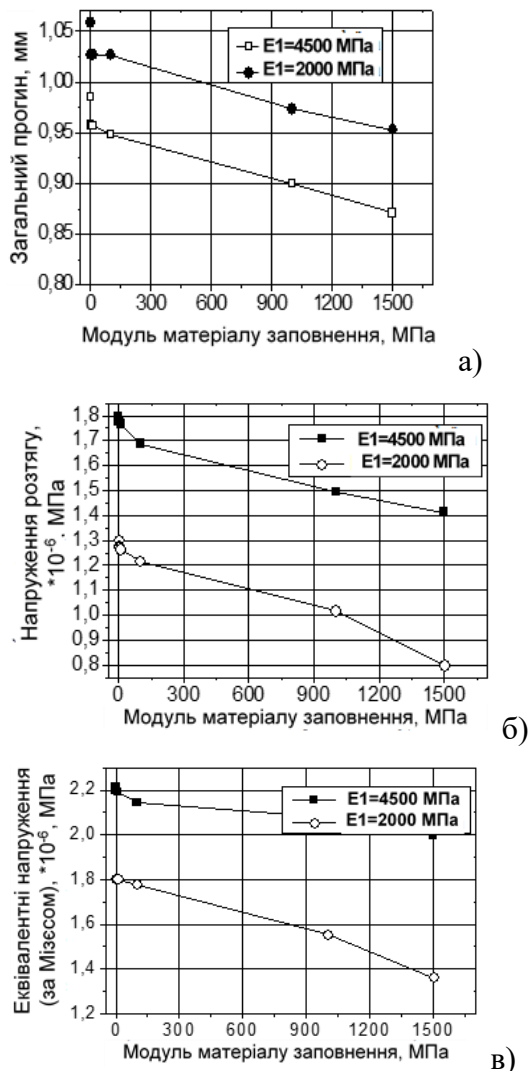


Рис. 2. Вплив матеріалу заповнення тріщин на показники НДС: а) загальний прогин; б) напруження розтягу на нижній фібрі верхнього шару; в) еквівалентні напруження за Мізесом на нижній фібрі верхнього шару

Результати розрахунків (таблиця 1) довели, що, незважаючи на збільшення прогину, для моделі № 3 (містить геосинтетичний матеріал) відносно шару посилення (модель № 1) (1,163 мм проти 1,099 мм відповідно), максимальні значення пружної деформації збільшуються для шару посилення без армування геосинтетичним матеріалом (0,00268 см проти 0.00247 см).

Таблиця 1 – Основні показники НДС конструкції дорожнього одягу

| Показники | Модель | | |
|---|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Прогин на поверхні покриття, мм. | 1,099 | 0,997 | 1,163 |
| σ_1 напруження розтягу на нижньої фібрі першого шару, $\cdot 10^{-6}$ МПа | 2,438 | 1,391 | 1,856 |
| σ_2 напруження розтягу на нижньої фібрі другого шару, $\cdot 10^{-6}$ МПа | - | 0,568 | 2,091 |
| σ_3 напруження розтягу на верхньої фібрі третього шару, $\cdot 10^{-6}$ МПа | 0,348 | 0,273 | 0,309 |
| σ_3 напруження розтягу на нижній фібрі третього шару, $\cdot 10^{-6}$ МПа | 1,197 | 1,473 | 1,181 |
| τ_3 напруження зсуву (максимальні значення на нижньої фібрі шару, що містить тріщину), $\cdot 10^{-6}$ МПа | 0,733 | 0,870 | 0,722 |
| τ_4 напруження зсуву (шар основи) | 0,168 | 0,118 | 0,171 |
| τ_5 напруження зсуву (грунт), $\cdot 10^{-6}$ МПа | 0,027 | 0,024 | 0,028 |

Альтернативний підхід полягає у розшивці тріщин, заповненні їх ремонтним матеріалом і наступному укладанні шару/шарів посилення. Для оцінки ефективності такого підходу прийнята Т-подібна тріщина, прикладання розрахункового навантаження по центру тріщини. Параметрами, що варіювалися у обчислювальних експериментах були – ширина розкриття тріщини, модуль пружності матеріалу заповнення тріщини.

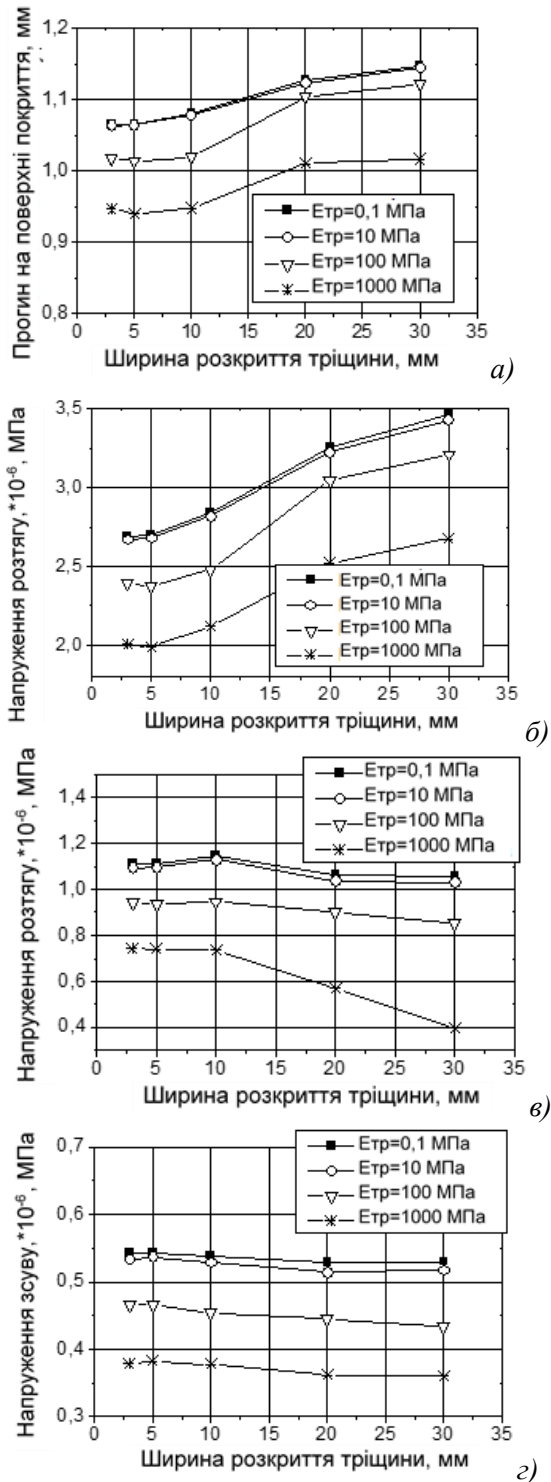


Рис. 3. Вплив ширини розкриття тріщини та матеріалу заповнювача на показники НДС: а) загальний прогин на поверхні покриття; б) напруження розтягу на нижньої фібри верхнього шару; в) напруження розтягу на верхньої фібри другого шару покриття; г) напруження зсуву на верхньої фібри другого шару покриття

Як свідчать результати чисельного моделювання (рис. 3), збільшення модуля пружності матеріалу заповнення тріщин в 1,5-2 рази зменшує напруження розтягу на верхньої фібри першого та другого шарів покриття.

Ще один можливий підхід полягає у влаштуванні проміжного шару – тріщиноперериваючого прошарку. Для порівняння напружень у шарах конструкції з одним шаром посилення й із двома шарами (шар посилення й тріщиноперериваючий прошарок) використовувалися дві ідентичні по інших параметрах моделі. Як свідчать отримані результати, для найпоширеніших значень параметрів тріщиноперериваючий прошарок знижує напруження на нижній фібри верхнього шару покриття на 12,5 %. Характерно, що при цьому знижуються також й напруження розтягу у шарі з тріщиною.

Результати, що отримані при моделюванні НДС конструкцій з підповерхневими тріщинами можуть бути застосовані при проектуванні капітального ремонту дорожніх одягів нежорсткого типу.

Висновки. Залучення методів чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій дорожніх одягів, що містять підповерхневу тріщину в монолітних шарах покриття, дозволило встановити, що одиночні підповерхневі тріщини, на відміну від наскрізних тріщин, незначно впливають на величину максимальних вертикальних переміщень (збільшення вертикальних переміщень не перевищує 5 %), що утрудняє їхнє виявлення при інструментальному вимірюванні пружного прогину конструкції по центру прикладання навантаження. У той же час, наявність підповерхневих тріщин може призводити до істотного змінювання не тільки максимальних значень напружень (як розтягу так й зсуву), але й до зміни просторового/поверхневого розподілу цих напружень. Отже, при розро-

бленні проектів ремонтних заходів необхідно враховувати ці факти й проводити оптимізацію по різних варіантах, що допускаються нормативними документами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Galatioto F. Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. [Text] / Fabio Galatioto, Yue Huang, Tony Parry, Roger Bird, Margaret Bell. / Transportation Research Part D 36, 2015. — P. 65–75.
2. Радовский Б.С. Определение напряжений в покрытии как вязкоупругом слое при колебаниях температуры. [Текст] / Радовский Б.С., Мозговой В.В. // Труды Союздорнии. Исследования по механике дорожной одежды. М.: Союздорнии, 1985. — С. 121-132.
3. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонных [Текст] / В.А. Золотарев. — Харьков: Высшая школа, 1977. — 116 с.
4. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Мозговой Владимир Васильевич — Киев, 1996. — 406 с.
5. Леонович И. И. Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости [Текст] / И. И. Леонович, И. С. Мельникова // Строительная наука и техника. — 2011. — № 4. — С.37-41.
6. Веренько В.А. Новые материалы в дорожном строительстве [Текст] / В.А. Веренько. — Минск.: УП «Технопринт», 2004. — 170 с.
7. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Гамеляк Ігор Павлович – Київ, 2005. – 438 с.
8. Гезенцвей Л.В. Восстановление асфальтобетонных покрытий [Текст] // Л.В. Гезенцвей, А.М. Алиев // Автомобильные дороги — 1980. — № 1. — С. 22-23.
9. Горельшев Н.В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы. [Текст]. / Н.В. Грелишев. — М.- Можайск: Терра, 1995. — 176 с.
10. Казарновский. В. Д. Методические рекомендации по применению объемной георешетки типа «Геовиб» при сооружении автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты Западной Сибири (для опытного строительства) [Текст] / В. Д. Казарновский, С.Е. Гречишев, Е.С. Пшеничникова. — М.: Союздорнии, 2003. — 48 с.
11. Мерзликин А.Е. Об особенностях напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с трещиновато-блочным основанием. [Текст] / А.Е Мерзликин // Труды Союздорнии. —1990. — С. 43-51.
12. Илиополов С.К. Механико-математическое моделирование системы «дорожная одежда грунт» при анализе динамических процессов в ее элементах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Илиополов Сергей Константинович — Ростов-на-Дону, 1999. — 228 с.
13. Pais J.C. Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavement. [Text] / J.C. Pais, P.A.A. Pereira, J.M.B. Sausa, S. Capitao — Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Correia & Branco (eds), 2002. — P. 585-594.
14. Oscarsson Erik. Mechanistic-Empirical Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Layers: Doctoral Thesis [Text]. / Erik Oscarsson. — Traffic and Roads Department of Technology and Society Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden, 2011. — 53 p.
15. Glover Charles J. Evaluation of Binder Aging and its Influence in Aging of Hot Mix Asphalt Concrete: Technical Report [Text] // Charles J. Glover, Guanlan Liu, Avery A. Rose, Yunwei Tong, Fan Gu, Meng Ling, Edith Arambula, Cindy Estakhri, and Robert Lytton, — Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office 125 East 11th St., Austin, Texas 78701-2483, Report No. FHWA/TX-14/0-6613-1. — 2013. — 216 p.
16. Fyfe R. Paving fabric seal design and performance on Australian roads/ 2nd international and sealing conference-sustaining sprayed sealing practice [Text] / R. Fyfe. — Melbourne, Australia. — 2010. — P. 1-31.
17. Coni M. FE evaluation of 4-point bending test for fatigue cracking assessment [Text] / M. Coni, S. Portas, R. Isola, J.R.M. Oliveira. —

- Sixth RILEM International Conference on racking in Pavements, Chicago, Illinois, 9-11 June 2008. – Chicago, USA. – 2008. – P. 1-10.
18. LCCA Procedures Manual [Text]. — State of California Department of Transportation Division of Maintenance Pavement Program, 2013. — 158 P.
 19. Леонович И. И. Диагностика автомобильных дорог: учебно-методическое пособие [Текст] / И. И. Леонович, С. В. Богданович. — Минск: БНТУ, 2012. — 226 с.
 20. Батракова А.Г. Операторная модель оценки текущего состояния дорожных одежд по результатам георадарного обследования [Текст] / А.Г. Батракова, С.Н. Урдзик, Д.О. Батраков // Науковий вісник будівництва - Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ – 2014. — № 1 (75). — С.174-177
 21. Батракова А.Г. Алгоритм оценки текущего состояния дорожных одежд, основанный на результатах георадарного обследования [Текст] / А.Г. Батракова // Науковий вісник будівництва - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ – 2013. — вип. 71. — С.315-320
 22. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности. [Текст] / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.

Батракова А.Г., Урдзик С.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УСИЛЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПОДПОВЕРХНОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ. Целью работы явля-

ется моделирование напряженно деформированного состояния конструкций дорожных одежд с подповерхностными трещинами при разработке проектных решений по ремонту и усилению дорожных одежд, находящихся в эксплуатации. Разработаны модели конструкций дорожных одежд с подповерхностными трещинами, позволяющие осуществить расчеты ключевых параметров напряженно-деформированного состояния при численном моделировании мероприятий по усилению конструкций дорожных одежд.

Ключевые слова: подповерхностные трещины, напряженно-деформированное состояние, конструкция дорожной одежды, напряжения, ремонтные мероприятия

Batrakova A.G., Urdzik S.N. MODELING OF THE EFFECT OF ACTIVITIES TO STRENGTHEN THE CONSTRUCTIONS OF ROAD PAVEMENTS WITH SUBSURFACE CRACKS. The purpose of the work is to simulate the stress-strain state of road pavements design with sub-surface cracks during investigation designing solutions for repairing and strengthening road pavements in operation. Models of constructions of road pavements with subsurface cracks are developed, allowing carrying out calculations of key parameters of the strained-deformed state during numerical modeling of activity on strengthening of designs of road pavements.

Keywords: subsurface fractures, strain-strain state, road pavement construction, stress, repair activity