

Розроблено метод оцінки напружено-деформованого стану дорожнього покриття внаслідок дії експлуатаційних навантажень. Для вирішення вказаної задачі використано розв'язок класичної задачі Бусінеска. Досліджено можливість урахування просторової конфігурації ділянок шосе при оцінці їх напружено-деформованого стану. Такий підхід дасть можливість створювати програмні комплекси для оцінки та прогнозування стану дорожнього покриття на основі аналізу трафіку

Ключові слова: дорожнє покриття, напружений стан, деформований стан, задача Бусінеска, радіус кривизни

Разработан метод оценки напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия вследствие действия эксплуатационных нагрузок. Для решения указанной задачи использовано решение классической задачи Бусинеска. Исследована возможность учета пространственной конфигурации участков шоссе при оценке их напряженно-деформированного состояния. Такой подход позволит создавать программные комплексы для оценки и прогнозирования состояния дорожного покрытия на основе анализа трафика

Ключевые слова: дорожное покрытие, напряженное состояние, деформированное состояние, задача Бусинеска, радиус искривлений

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

А. П. Олійник

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: andrij-olijnyk@rambler.ru

Б. С. Незамай

Кандидат технічних наук, доцент*

*Кафедра математичних методів в інженерії**

E-mail: boris_may@ukr.net

В. І. Пулик

Магістрант

Кафедра комп'ютерних технологій в системах управління і автоматики**

E-mail: vikapulyk@gmail.com

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ,

Україна, 76019

1. Вступ

Стан автомобільних доріг України викликає багато нарікань у користувачів транспортних засобів, оскільки він впливає на швидкість та якість перевезень, обумовлює значне погіршення стану технічних засобів, що експлуатуються в даних умовах. Не завжди вдається відповісти на питання про те, чому автомобільні шляхи приходять в неналежний стан вже через декілька місяців після ремонту. Очевидно, що проблематика оцінки технічного стану автомобільних доріг є актуальною.

Вона розглядається в різних аспектах – дослідження апаратними методами, що вимагає, як правило, значних об'ємів експериментальних досліджень, а також методами математичного моделювання, що є особливо ефективним за умов сучасного рівня розвитку комп'ютерної техніки.

В запропонованій роботі наведено математичні моделі процесу деформування та напруженого стану дорожнього покриття при різних умовах експлуатації та зміну геометричної конфігурації траси, розглядаються різні схеми навантаження дорожнього покриття.

2. Літературний огляд та постановка проблеми

Незважаючи на те, що методики прокладання доріг, технології виготовлення дорожнього покриття є добре відомими [1–3], при їх практичній реалізації показники якості відрізняються від реальних. У зв'язку з цим виникає потреба діагностування реального технічного стану дорожнього покриття. В найпростішій постановці задачі оцінки напружено-деформованого стану дорожнього покриття використовується задача оцінки напруженого стану півпростору, який виникає внаслідок дії зосередженої сили P [3].

Існує значна кількість досліджень задач такого роду [4–6], проте вони, як правило, присвячені вирішенню задач теоретичного характеру. Для вирішення вказаної задачі з урахуванням особливостей досліджуваних об'єктів – автомобільних доріг – використовується розв'язок класичної задачі Бусінеска [7] про дію зосередженої сили P на границі пружного півпростору $x_3 = 0$, причому лінія дії сили ортогональна його границі.

Задача Бусінеска є універсальним засобом для моделювання широкого класу задач технічної діаг-

ностики (дорожнє покриття, елементи конструкції об'єктів нафтогазової промисловості, злітно-посадкові смуги аеропортів тощо). Крім того, необхідно вказати на те, що використання результатів вирішення задачі Бусінеска дозволяє побудувати достатньо простий розрахунковий алгоритм при моделюванні реальних об'єктів – достатньо строгий математичний апарат адаптується до конкретної технічної задачі.

При цьому при вирішенні таких задач вдається уникнути необхідності урахування сингулярностей в розрахункових алгоритмах шляхом відповідного підбору схем навантаження [9].

Важливого значення набуває також побудова моделей для оцінки зміни НДС дорожнього покриття з урахуванням особливостей реального стану покриття (зміна геометричної конфігурації дорожнього покриття, особливості експлуатації, тип транспортних засобів тощо) з використанням класичних підходів [8–10].

Метою дослідження є:

- моделювання процесу деформування та напруженого стану дорожнього покриття з використанням методів класичної теорії пружності (розв'язок задачі Бусінеска) та урахуванням схем навантаження покриття, інтенсивності руху, властивостей матеріалу та їх зміни внаслідок часу та умов експлуатації;

- розробка програмного забезпечення для реалізації вказаних моделей, що дозволяє робити ефективні прогнози стосовно часу експлуатації покриття та корегувати схеми та технологію прокладання та ремонту доріг для підвищення надійності їх експлуатації.

3. Математична модель процесу деформування дорожнього покриття

Згідно з результатами [7] розв'язку задачі Бусінеска компоненти вектора переміщень, обумовлені дією на півпростір зосередженої сили P , визначаються за формулами:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{P(1+\nu)x_1}{2\pi E} \left[\frac{x_3}{r^3} - \frac{1-2\nu}{r(\gamma+x_3)} \right]; \\ U_2 = \frac{P(1+\nu)x_2}{2\pi E} \left[\frac{x_3}{r^3} - \frac{1-2\nu}{r(\gamma+x_3)} \right]; \\ U_3 = \frac{P(1+\nu)x_3}{2\pi E} \left[\frac{x_3^2}{r^3} + \frac{1-2\nu}{r(\gamma+x_3)} \right], \end{cases} \quad (1)$$

де x_1^2, x_2^2, x_3^2 – декартові координати точки, в якій визначаються переміщення; P – зосереджена сила, E – модуль Юнга матеріалу, з якого виготовлено дорожнє покриття, ν – коефіцієнт Пуассона цього матеріалу, $\gamma = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$, якщо точка прикладення сили має координати $(0;0;0)$.

Компоненти тензора напружень при цьому обчислюються за формулами:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{x_1^2 x_3}{r^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{\gamma^2 + \gamma x_3 + x_3^2}{r^3(\gamma+x_3)} - \frac{x_1^2(2\gamma+x_3)}{r^3(\gamma+x_3)^2} \right) \right]; \\ \sigma_{12} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{x_1 x_2 x_3}{r^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(-\frac{x_1 x_2(2\gamma+x_3)}{r^3(\gamma+x_3)} \right) \right]; \\ \sigma_{22} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{x_2^2 x_3}{r^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{\gamma^2 + \gamma x_3 + x_3^2}{r^3(\gamma+x_3)} - \frac{x_2^2(2\gamma+x_3)}{r^3(\gamma+x_3)^2} \right) \right]; \\ \sigma_{13} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{x_1 x_3^2}{r^5}; \\ \sigma_{23} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{x_2 x_3^2}{r^5}; \\ \sigma_{33} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{x_3^3}{r^5}. \end{cases} \quad (2)$$

Для оцінки напружено-деформованого стану на поверхні дорожнього покриття ($x_3 = 0$) формули (1) та (2) використовуються у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 = -\frac{P(1+\nu)x_1(1-2\nu)}{2\pi E \gamma^2}; \\ U_2 = -\frac{P(1+\nu)x_2(1-2\nu)}{2\pi E \gamma^2}; \\ U_3 = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E \gamma}, \end{cases} \quad (3)$$

а для компонент тензора напружень:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{2\gamma x_1^2}{r^5} \right) \right]; \\ \sigma_{12} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{3} \left(-\frac{2\gamma x_1 x_2}{r^5} \right) \right]; \\ \sigma_{22} = -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{2\gamma x_2^2}{r^5} \right) \right], \end{cases} \quad (4)$$

де $\gamma = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$.

Формули (1), (2) можуть бути використані для оцінки напружено-деформованого стану дорожнього покриття в тому випадку, коли сила P прикладена в точці з координатами $\eta(\eta_1, \eta_2, 0)$. При цьому вони набувають вигляду:

$$\begin{cases} U_1(\bar{x}; \bar{\eta}) = -\frac{P(1+\nu)(x_1 - \eta_1)}{2\pi E} \left[\frac{x_3}{r_\eta^3} - \frac{1-2\nu}{r_\eta(\gamma_\eta + x_3)} \right]; \\ U_2(\bar{x}; \bar{\eta}) = -\frac{P(1+\nu)(x_2 - \eta_2)}{2\pi E} \left[\frac{x_3}{r_\eta^3} - \frac{1-2\nu}{r_\eta(\gamma_\eta + x_3)} \right]; \\ U_3(\bar{x}; \bar{\eta}) = -\frac{P(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{x_3}{r_\eta^3} - \frac{2(1-\nu)}{r_\eta} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Для компонент тензора напружень:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{11} &= -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{(x_1 - \eta_1)^2 x_3}{r_\eta^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{r_\eta^2 + r_\eta x_3 + x_3}{r_\eta^3 (r_\eta + x_3)} - \frac{(x_1 - \eta_1)^2 (2r_\eta + x_3)}{r_\eta^3 (r_\eta + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{12} &= -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{(x_1 - \eta_1)(x_2 - \eta_2)x_3}{r_\eta^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(-\frac{(x_1 - \eta_1)(x_2 - \eta_2)(x_3 + 2r_\eta)}{r_\eta^3 (r_\eta + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{22} &= -\frac{3P}{2\pi} \left[\frac{(x_2 - \eta_2)x_3}{r_\eta^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{r_\eta^2 + r_\eta x_3 + x_3^2}{r_\eta^3 (r_\eta + x_3)} - \frac{(x_2 - \eta_2)^2 (2r_\eta + x_3)}{r_\eta^3 (r_\eta + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{13} &= -\frac{3P(x_1 - \eta_1)x_\eta^5}{2\pi r_\eta^5}, \\ \sigma_{23} &= -\frac{3P(x_2 - \eta_2)x_\eta^5}{2\pi r_\eta^5}, \\ \sigma_{33} &= -\frac{3P}{2\pi r_\eta^5} x_3^2, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де $r_\eta = \sqrt{(x_1 - \eta_1)^2 + (x_2 - \eta_2)^2 + (x_3 - \eta_3)^2}$.

З метою вивчення залежності компонент тензора напружень від глибини при дії фіксованої сили було досліджено поведінку залежностей (2) від x_3 при фіксованих значеннях x_1, x_2 та сталих фізико-механічних параметрах матеріалу. В формулі (2) остання залежність має вигляд:

$$\sigma_{33} = -\frac{3Px_3^2}{2\pi r_\eta^5} = -\frac{3P}{2\pi} \cdot x_3^2 \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{5/2} = F_1(x_3). \quad (7)$$

Досліджуючи $F(x_3)$ на екстремум, одержується:

$$F_1'(x_3) = -\frac{3Px_3^2(3x_1^2 + 3x_2^2 - 2x_3^2)}{2\pi(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{7/2}}. \quad (8)$$

З умови $F_1'(x_3) = 0$ встановлюється, що екстремальне значення $F_1(x_3) = \sigma_{33}$ досягається на глибині:

$$x_3 = \sqrt{\frac{2x_1^2 + 2x_2^2}{3}}. \quad (9)$$

Умова (9) дозволяє зробити висновки про те, що максимальні значення напружень досягається на певній глибині, яку можна визначити за формулою (9). Аналогічно можна встановити, що максимальні значення для σ_{13} та σ_{23} досягаються в точках:

$$x_3 = \sqrt{\frac{2x_1^2 + 2x_2^2}{3}}. \quad (10)$$

Для оцінки поведінки компонент σ_{11} , σ_{12} та σ_{22} будуються графіки цих функцій від x_3 при фіксованих x_1 та x_2 при однакових значеннях діючих сил та характеристик E та ν матеріалу. Розподіл цих напружень подано на рис. 1.

На основі результатів, наведених на рис. 1, можна зробити висновок про те, що всі компоненти тензора напружень мають максимум на певній глибині дорожнього покриття, що висуває певні технологічні вимоги до спорудження об'єктів такого роду. Для більш детального вивчення розподілу значень механічних напружень необхідно задати реальні значення параметрів P, E, ν, x_1, x_2, x_3 , оскільки дані, подані на рис. 1, мають модельний характер.

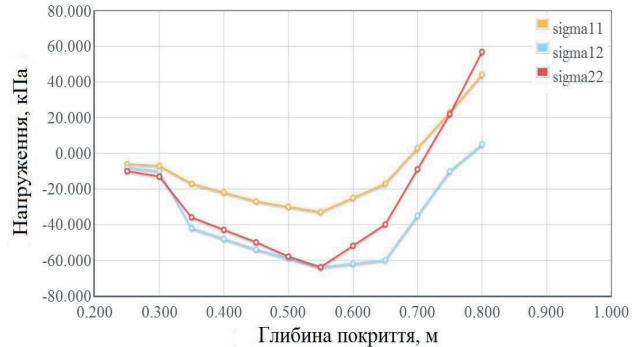


Рис. 1. Розподіл напружень по глибині дорожнього покриття

Для оцінки впливу на НДС дорожнього покриття пропонується наступна схема (рис. 2):

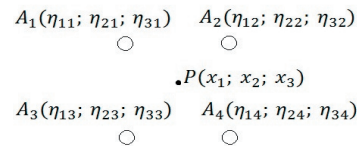


Рис. 2. Схема навантаження дорожнього покриття від одного транспортного засобу

В точках $A(\eta_{1i}, \eta_{2i}, \eta_{3i})$ зосереджено навантаження $P/4$, де P – вага транспортного засобу. В такому випадку компоненти тензора напружень в точці $P(x_1, x_2, x_3)$ можуть бути визначені за формулами:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{11} &= -\sum_{i=1}^4 \frac{3P}{4\pi} \left[\frac{(x_1 - \eta_{1i})^2 x_3}{r_{\eta_i}^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{r_{\eta_i}^2 + r_{\eta_i} x_3 + x_3}{r_{\eta_i}^3 (r_{\eta_i} + x_3)} - \frac{(x_1 - \eta_{1i})^2 (2r_{\eta_i} + x_3)}{r_{\eta_i}^3 (r_{\eta_i} + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{12} &= -\sum_{i=1}^4 \frac{3P}{8\pi} \left[\frac{(x_1 - \eta_{1i})(x_2 - \eta_{2i})x_3}{r_{\eta_i}^5} - \frac{1-2\nu}{3} \left(-\frac{(x_1 - \eta_{1i})(x_2 - \eta_{2i})(x_3 + 2r_{\eta_i})}{r_{\eta_i}^3 (r_{\eta_i} + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{22} &= -\sum_{i=1}^4 \frac{3P}{8\pi} \left[\frac{(x_2 - \eta_{2i})x_3}{r_{\eta_i}^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left(\frac{r_{\eta_i}^2 + r_{\eta_i} x_3 + x_3^2}{r_{\eta_i}^3 (r_{\eta_i} + x_3)} - \frac{(x_2 - \eta_{2i})^2 (2r_{\eta_i} + x_3)}{r_{\eta_i}^3 (r_{\eta_i} + x_3)^2} \right) \right], \\ \sigma_{13} &= \sum_{i=1}^4 \frac{3P}{8\pi} \frac{(x_1 - \eta_{1i})x_\eta^2}{r_{\eta_i}^5}, \\ \sigma_{23} &= \sum_{i=1}^4 \frac{3P}{8\pi} \frac{(x_2 - \eta_{2i})x_\eta^2}{r_{\eta_i}^5}, \\ \sigma_{33} &= -\sum_{i=1}^4 \frac{3P}{8\pi} \frac{x_3^2}{r_{\eta_i}^5}, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$r_{ni} = \sqrt{(x_1 - \eta_{1i})^2 + (x_2 - \eta_{2i})^2 + (x_3 - \eta_{3i})^2}.$$

Результати (11) можуть бути узагальнені на випадок ділянки дороги, по якій рухаються *k* транспортних засобів різної ваги P_j (рис. 3 та рис. 4).

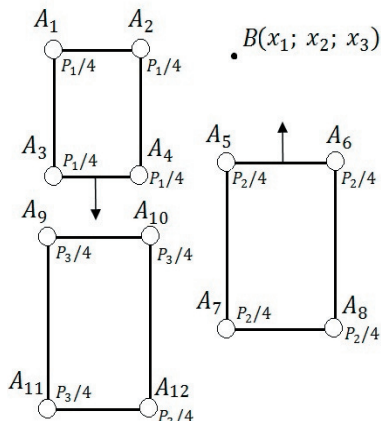


Рис. 3. Схема оцінки навантаження на дорожнє покриття для трьох транспортних засобів

Навантаження на дорожнє покриття в точці $B(x_1, x_2, x_3)$ визначається за формулами (11), проте в кожній із сум в даному випадку буде не чотири, а $4k$ доданків, де *k* – кількість транспортних засобів, кожен з яких має вагу $P_{j=1,...,k}$.

На рис. 4 відображено ділянку дороги, що представляє собою дві полоси різних напрямків. Точки A_i виражають зони контакту транспортних засобів з дорожнім покриттям (колеса), а $P_{j=1,...,k}$ - навантаження, прикладене до дорожнього покриття за рахунок маси та прискорення транспортного засобу. Лінії, що з'єднують ці точки, це відстані між колесами (колісна база – відстань між переднім і заднім колесом, колісна пара – відстань між лівим і правим колесом).

Дану ділянку для зручності відображено в першій чверті декартової системи координат таким чином, щоб праве переднє колесо (точка A_1) першого транспортного засобу було точкою відліку. Метою дослідження є визначення напружень в точці B з координатами (x_1, x_2, x_3) .

Для такого експерименту було обрано конкретні транспортні засоби, що представляють собою легкові автомобілі. Маса автомобілів варіюють від 1116 до 2135 кг. Колісні бази – від 2470 до 3002 мм, колісні пари – від 1110 до 1651 мм [12]. Посилаючись на цю інформацію, можна визначити координати всіх точок і навантаження, прикладені в них.

Використання залежностей виду (6), (11) передбачає, що рух транспортних засобів здійснюється по прямолінійних траєкторіях. В той же час багато ділянок доріг не є прямолінійними, наявні викривлення осей доріг в різних площинах, що обумовлює появу додаткових навантажень. Зокрема, в разі викривлень у вертикальній площині викликає додаткове навантаження від дії відцентрової сили, яке можна оцінити за відомою формулою:

$$P_y = \frac{mv^2}{R}, \tag{12}$$

де *m* – маса транспортного засобу; *v* – швидкість його руху; *R* – радіус кривизни траєкторії. Радіус кривизни траєкторії можна визначити багатьма способами. Якщо лінія дороги може бути математично параметризована у вигляді аналітичної залежності $y=f(x)$, то радіус кривизни може бути визначений за відомою формулою:

$$\frac{1}{R} = \frac{y''(x)}{[1+y'^2(x)]^{3/2}}, \tag{13}$$

причому вказаний радіус кривизни визначається в точці $(x, f(x))$.

Причому випадок аналітичного задання $y=f(x)$ стосується лише окремих модельних ділянок. В переважній більшості практичних випадків вказана залежність не може бути одержаною. Як правило (рис. 5), можна визначити координати трьох точок.

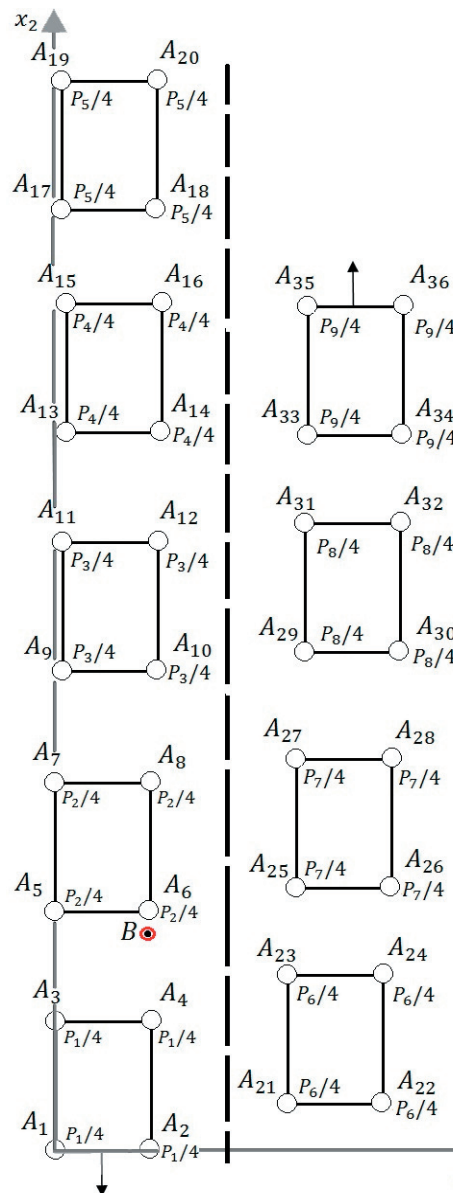


Рис. 4. Схема оцінки навантаження на дорожнє покриття для дев'яти транспортних засобів

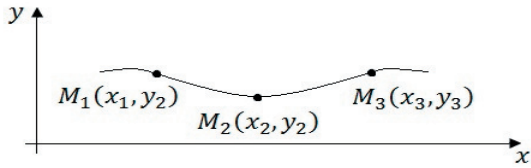


Рис. 5. Модель автодороги з вертикальним викривленням осі

В такому випадку радіус кривизни траєкторії автодороги може бути визначений як радіус кола, що проходить через вказані три точки. Координати центра цього кола можуть бути визначені за формулою:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(x_2^2 + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2)(y_3 - y_1) - (x_3^2 + y_3^2 - y_1^2 - x_1^2)(y_2 - y_1)}{2(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 2(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \\ y_0 = \frac{(x_3^2 + y_3^2 - y_1^2 - x_1^2)(x_2 - x_1) - (x_2^2 + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2)(x_3 - x_1)}{2(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 2(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \end{cases} \quad (14)$$

Координати (14) є розв'язком системи рівнянь:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = R^2; \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = R^2; \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 = R^2. \end{cases} \quad (15)$$

За відомими координатами (14) x_0 та y_0 можна знайти радіус кривизни траєкторії за будь-яким з рівнянь системи (15):

$$R = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}. \quad (16)$$

4. Результати тестових розрахунків та їх аналіз

Для розрахунку розробленої математичної моделі створено програмний пакет, що дозволить оцінити напружено-деформований стан дорожнього покриття.

Виходячи з умов та схеми на рис. 4 було проведено розрахунки тензорів напружень для дев'яти транспортних засобів (рис. 6). Оскільки при збільшенні відстані до зафіксованої точки В напруження різко зменшуються, було виведено лише ті навантаження, які прикладаються в радіусі 4 метрів. Як зображено на рис. 7, від найближчої точки прикладення навантажень напруження є найбільшими і складають 342 кПа. Просумувавши всі напруження отримаємо 472 кПа.

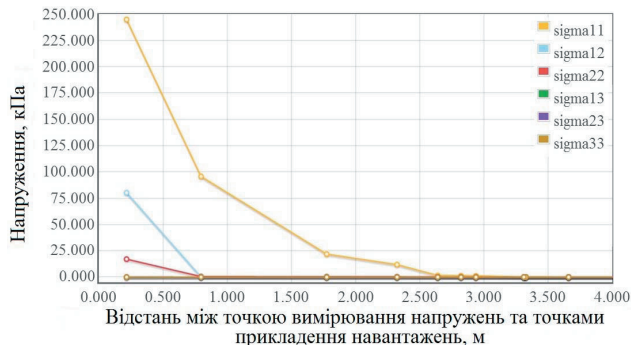


Рис. 6. Зміна напружень при зменшенні відстані до точки вимірювання

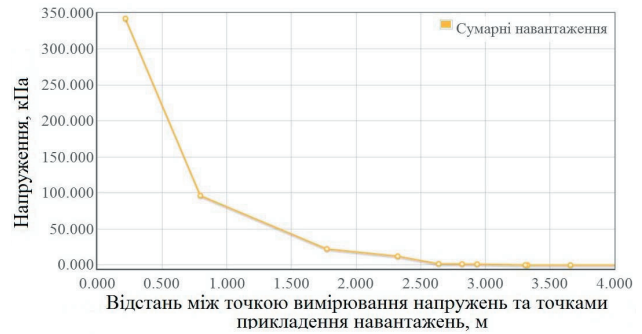


Рис. 7. Сумарні навантаження в кожній точці

Зважаючи на те, що верхній шар дорожнього покриття (асфальтобетон) в сухому вигляді та при температурі до +5° С має межу текучості 2.2 МПа, а коефіцієнт Пуассона в такому випадку рівний 0.18 [6], то даний результат цілком задовольняє поставленій задачі. Проте значення цих навантажень значно зміняться при зміні наступних умов:

- підвищення температури асфальтобетону до +50 °С (це в свою чергу приведе до зменшення межі текучості до 1.1 та збільшення коефіцієнта Пуассона до 0.29 [5]);

- збільшення навантажень на дорожнє покриття (за рахунок зміни типу транспортного засобу);

Для реалізації даних умов розрахуємо математичну модель для вантажного транспортного засобу. Обрана вантажівка має дві осі, тобто дві колісні пари, але задня пара – зі здвоєними шинами, тому умовно розділимо вагу на шість частин і врахуємо це в формулі (11).

А також збільшимо коефіцієнт Пуассона до 0.29. Результати розрахунків показано на рис. 8.

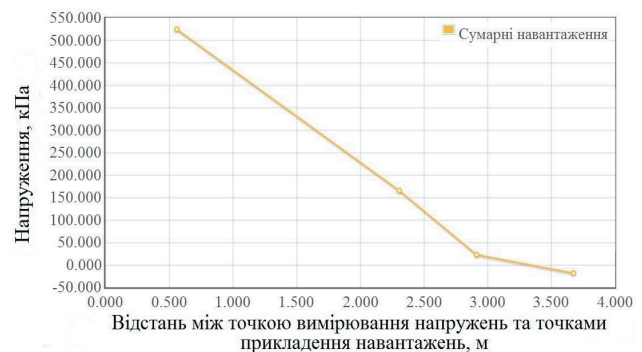


Рис. 8. Розподіл напружень під дією вантажного транспортного засобу

Отже, в контрольній точці напруження будуть рівними 711кПа. А при заданих умовах межа напружень дорівнює 1.1 МПа.

Тобто результат такого дослідження можна вважати близьким до критичного.

На рис. 9 зображено результати розрахунку напружень по глибині дорожнього покриття при прикладенні ваги вантажного транспортного засобу та з коефіцієнтом Пуассона рівним 0.3 (оскільки потрібно врахувати те, що до глибини 60 см розміщуються декілька шарів щебеню, а глибше – ґрунти та глина).

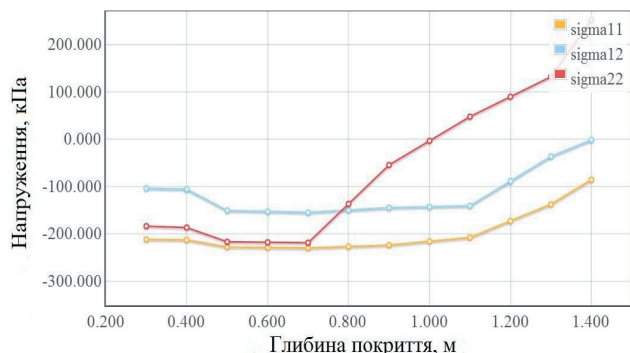


Рис. 9. Розподіл напружень по глибині дорожнього покриття

Результат підтверджує те, що на певній глибині покриття досягаються максимальні за модулем напруження.

А якщо зважати на те, що на глибині 70 см розміщений нестабільний земляний покрив, який спеціальним чином не утрамбовується, то сумарні напруження з рис. 9 вже можуть бути загрозливими для всіх верхніх шарів дорожнього покриття.

5. Висновки

Аналізуючи наведену інформацію, можна зробити висновки про те, що:

- розроблено модель процесу деформування дорожнього покриття, яка враховує реальну конфігурацію навантажень на поверхню, температуру середовища;

- при аналізі напружено-деформованого стану дорожнього покриття за допомогою розв'язку задачі Бу-сінеска виявлено, що максимальні напруження встановлюються на певній глибині покриття, яка залежить від величини діючого на покриття навантаження.

- одержані результати дадуть можливість діагностувати та прогнозувати стан доріг на основі інформації про будову дорожнього полотна та оцінки інтенсивності руху транспорту.

Напрямки подальших досліджень можуть бути пов'язаними з вивченням поведінки матеріалу, з якого виготовлено дорожнє покриття, при циклічних навантаженнях, що дозволить оцінити час експлуатації дорожнього покриття в реальних умовах експлуатації. При цьому необхідно використати експериментальні методи дослідження спеціально підібраних зразків дорожнього покриття.

Література

1. Харченко, А. М. Сучасні аспекти проектування річної програми робіт дорожньо-ремонтних організацій [Текст] : тези доп. / А. М. Харченко // 65-та науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. – Київ: НТУ, 2009. – 122 с.
2. Baltic Road Association [Electronic Resource] / Available at : http://www.balticroads.org/downloads/27BRC/27BRC_A2_Tootsi_1.pdf. – Title from the screen.
3. Победря, Б. Е. Лекции по теории упругости [Текст] / Б. Е. Победря, Д. В. Георгиевский. – М.: Эдиториал, УРСС, 1999. – 208 с.
4. Гамеляк, І. П. Надійність конструкції дорожнього одягу. Частина 1. Проектна та технологічна надійність [Текст] / І. П. Гамеляк // Автошляховик України. – 2006. – №5. – С. 39–44.
5. Ищенко, И. С. Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий [Текст] / И. С. Ищенко, Т. Н. Калашникова, Д. А. Семенов. – М.: Аир Арт, 2001. – 173 с.
6. Горельшев, Н. В. О пластичности дорожнего асфальтового бетона [Текст] / Н. В. Горельшев, Ф. Н. Пантелеев // Труды МАДИ. – 1933. – Вып. 15. – С. 138–152.
7. Bueckner, H. F. A novel principles for the computation of stress intensity factors [Text] / H. F. Bueckner // ZAMM. – 1970. – Vol. 50 (9). – P. 529–546.
8. Eck, C. Asymptotic analysis for a mixed boundary-value contact problem [Text] / C. Eck, S. A. Nazarov, W. L. Wendland // Arch. Ration. Mech. Analysis. – 2001. – Vol. 156. – P. 275–316.
9. Aleksandrov, V. M. Asymptotic methods in contact mechanics [Text] / V. M. Aleksandrov // Math. Comp. Modelling. – 1998. – Vol. 28 (4-8). – P. 29–35.
10. Pearson, C. E. Theoretical Elasticity [Text] / C. E. Pearson. – Cambridge, Massachusetts: Harvard Univ. Press, 1959. – 218 p.
11. Rajapakse, R. Load-transfer problems for the transversely isotropic elastic media [Text] / R. Rajapakse, Y. Wang // J. Eng. Mechanics. – 1990. – Vol. 116 (12). – P. 2643–2662.
12. Ремонт, обслуживание, эксплуатация автомобилей [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.autopropect.ru>.