

УДК 625:75

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.91111

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ, ВІДНОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛІНГУ

© С. М. Талах, О. М. Дубик, К. М. Лисницька

Розглянуто питання вдосконалення наукової бази по визначенню напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу. Приведено результати чисельного розрахунку напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів на ділянці автомобільної дороги Кив-Ковель (км 297+700 – км 302+400) з використанням програмного комплексу автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій (KARTPK). Проаналізовано реальний стан ділянки автомобільної дороги через 8,5 років після виконання ресайклінгу

Ключові слова: чисельний розрахунок, метод скінченних елементів, переміщення, напружено-деформований стан, дорожній одяг

1. Вступ

На сьогоднішній день стан дорожньої інфраструктури в Україні значно погіршився. В нашій державі склалася така ситуація, коли більшість доріг необхідно відновлювати. Однією з найбільш поширених та економічно виправданих технологій відновлення є технологія холодного ресайклінгу, суть якої полягає у фрезеруванні існуючого дорожнього одягу, змішуванні подрібненого матеріалу із в'язкими речовинами, укладанні суміші на попереднє місце з подальшим його ущільненням.

Однак при застосуванні тієї чи іншої технології ремонту чи реконструкції автомобільної дороги необхідно врахувати всі умови, які впливають на роботу конструкції дорожнього одягу. Правильне призначення товщини шару відновлення має дуже важливе значення як з інженерної, так із економічної та наукової точок зору. Призначити оптимальну конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу, практично неможливо без оцінки її напружено-деформованого стану (НДС).

2. Літературний огляд

Холодний ресайклінг – це сучасна прогресивна технологія відновлення дорожнього одягу нежорсткого. Аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері розвитку технології холодного ресайклінгу показав, що в Україні незначна увага приділялася проблемі призначення оптимальної товщини регенованого шару [1–3], що має супроводжуватись розрахунком НДС конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, особливо на дію навантаження від надважких автотранспортних засобів.

На даний час в Україні розрахунок і проектування нежорстких дорожніх одягів здійснюється за нормативними документами ВБН В.2.3 – 218 – 186 – 2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу» [4], ДБН В.2.3 – 4: 2015 «Автомобільні дороги» [5], у Росії – згідно з нормами [6].

При виконанні розрахунків НДС нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу, запропоновано застосувати моменту схему скінченних елементів (МССЕ), що

дозволяє просто і ефективно врахувати явище «хибного зсуву» [7–9].

Однак норми [4, 6] мають певні недоліки. За існуючими методиками проектування неможливо врахувати просторовий характер прикладання навантаження та взаємодію дорожнього одягу з однорідною чи неоднорідною ґрунтовою основою [10]. Для цього потрібна кількісна оцінка НДС, що можливо лише з використанням чисельних методів розрахунку і зокрема методу скінченних елементів (МСЕ) [11–14].

3. Об'єкт, мета і задачі дослідження

Об'єкт дослідження – процес деформування шарів дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу.

Мета дослідження – проведення чисельних експериментів по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу на дію навантаження від надважких автотранспортних засобів.

Задачі дослідження – встановлення залежності зміни компонентів повного тензора напружень від товщини шару ресайклінгу із урахуванням просторового характеру прикладання навантаження.

4. Методика дослідження

Для виконання розрахунків НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу, був розроблений спеціальний алгоритм та математична модель, що увійшли до програмного комплексу автоматизованого розрахунку тонкостінних просторових конструкцій (KARTPK).

Для розв'язання задачі розрахунку на міцність конструкцій нежорстких дорожніх одягів було використано варіаційне рівняння руху в довільний момент часу [7–9, 14–16]:

$$\int_V (\hat{\sigma}' + \hat{C}_4 \cdot \hat{\gamma}) \cdot \delta \hat{\gamma} dv + \int_V \hat{\rho} \ddot{u} \cdot \delta \ddot{u} dv - \int_V \hat{p} \cdot \delta \ddot{u} dv - \int_V \hat{q} \cdot \delta \ddot{u} ds = 0, \quad (1)$$

де $\hat{\sigma}'$ – тензор початкових напружень Піола-Кірхгофа; $\hat{\gamma}$ – тензор приростів кінцевих деформацій Коші-Гріна; \vec{u} , $\vec{\bar{u}}$ – вектори приростів переміщень і прискорень; \vec{p} , \vec{q} – узагальнені вектори об'ємних і поверхневих сил; ρ – щільність матеріалу суцільного середовища; \hat{C}_4 – тензор пружностей четвертого рангу.

Моделювання НДС конструкції дорожніх одягів здійснюється шестигранними ізопараметричними скінченними елементами (рис. 1). Кожна із граней скінченного елемента описується поверхнею гіперболічного параболоїда.

Формули апроксимацій ізопараметричного оболонкового скінченного елемента мають вигляд:

$$Z^i(x_{(e)}^i) = \sum_{s1 \pm 1} \sum_{s2 \pm 1} \sum_{s3 \pm 1} \prod_{k=1}^3 \left(S_{(k)} x_{(e)}^k + \frac{1}{2} \right) Z_{s1s2s3}^i; \quad (2)$$

$$u^i(x_{(e)}^i) = \sum_{s1 \pm 1} \sum_{s2 \pm 1} \sum_{s3 \pm 1} \prod_{k=1}^3 \left(S_{(k)} x_{(e)}^k + \frac{1}{2} \right) u_{s1s2s3}^i, \quad (3)$$

де $S_k = \begin{cases} +1 & \text{при } x_{(e)}^k > 0 \\ -1 & \text{при } x_{(e)}^k < 0 \end{cases}$ – умовні лагранжеві координати; $x_{(e)}^k = \pm \frac{1}{2}$ – місцеві нормалізовані координати скінченного елемента; Z_{s1s2s3}^i – вузлові переміщення скінченного елемента в глобальному базисі, $n = 1, 8$.

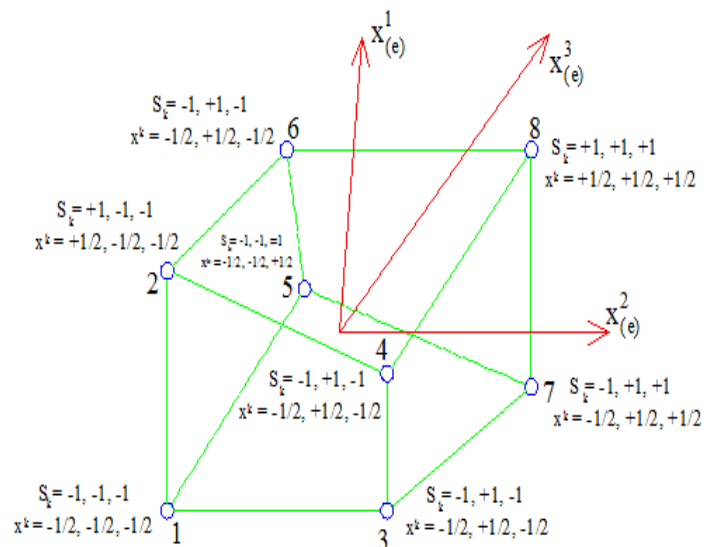
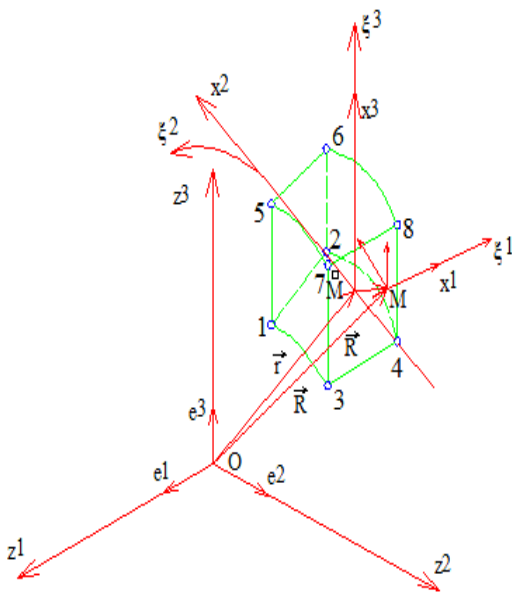


Рис. 1. Шестигранні ізопараметричні скінченні елементи

Компоненти матриці жорсткості SE-моделі після інтегрування рівняння руху з використанням співвідношень МССЕ визначаються за формулою:

$$\left[K_{(NL)}^{i'j'(n)} + c_{(N)}^{(n)} n_{(N)}^{(i')} n_{(M)}^{(j')} \delta^{i'j'} \delta_{(NL)} \right] \Delta \{ u_{i+1}^{j'(n+1)} \} = \{ Q_{(N)}(u_i^{j'(n+1)}) \} - \{ R_{(N)}(u_i^{j'(n+1)}) \} - \underline{Q}_{(N)(0)}^{j'}, \quad (4)$$

де w – компоненти вектора одиничної нормалі у вузлах пластини; $c_{(N)}^{(n)}$ – приведена функція коефіцієнту пропорційності реакції ґрунтової основи у вузлі N ; n – номер кроку продовження за параметром збурення; i – номер ітерації Ньютона-Канторовича в межах n -го кроку продовження; $K_{(NL)}^{i'j'(n)}$ – матриця жорсткості скінченно-елементної моделі; $c_{(N)}^{(n)} n_{(N)}^{(i')} n_{(M)}^{(j')} \delta^{i'j'} \delta_{(NL)}$ – прирости діагональних коефіцієнтів матриці жорсткості скінченно-елементної моделі; $Q_{(N)(0)}^{j'}$ – компоненти векторів вузлових реакцій ґрунтової основи.

Спрощена модель ґрунтової основи має вигляд:

$$q(x^2, x^3) = -c(x^2, x^3)w, \quad (5)$$

де $c(x^2, x^3)$ – функція коефіцієнта постелі; w – позитивний прогин в даній точці.

Чисельний розрахунок НДС конструкцій нежорстких дорожніх одягів здійснювався за допомогою обчислювального програмного комплексу KARTPK, який успішно використовується для науково-дослідних та проектно-конструкторських розробок. Розроблені програми дозволяють враховувати ряд процесів і факторів, які впливають на НДС конструкції. Програмний комплекс KARTPK, а саме його розділ ARDO (автоматизований розрахунок дорожніх одягів) дозволяє виконувати автоматизований розрахунок нелінійних задач фізичного моделювання та оптимального проектування комбінованих багатопарових систем дорожнього одягу. Максимальна кількість невідомих розрахункового фрагменту може сягати понад 50 тисяч.

5. Результати чисельних експериментів по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу

Для виконання чисельного експерименту по дослідженню НДС нежорстких дорожніх одягів відновлених за технологією холодного ресайклінгу була вибрана ділянка дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400), на якій виконувалась реконструкція у 2007 році за зазначеною технологією. Дані про шари відновленого дорожнього одягу наведені у табл. 1.

Проте через 8,5 років після реконструкції на даній ділянці дороги в результаті візуального обстеження було виявлено ряд дефектів: колії, локальна сітка тріщин, ямковість, викришування верхнього шару (рис. 2).

Виникнення яких можна пояснити недосконалістю методики згідно норм [4], за якою виконувалося проектування. У зазначеному нормативному документі не враховується взаємодія конструкції дорожнього одягу з ґрунтовою основою.

Дослідити НДС ґрунтового півпростору та просторовий характер прикладання навантаження можливо чисельними методами з використанням МССЕ та програмного комплексу KARTPK.

Чисельний розрахунок виконувався на дію навантаження від автопоїзду DAF-FT XF95 + напівпричепKögel – GN-24. Схеми розстановки коліс автопоїзда та розподіл осьових навантажень наведені на рис. 3, 4.

Таблиця 1

Дані про шари конструкції дорожнього одягу та їх характеристики

Но-мер шару	Назва шару матеріалу	Товщина шару, см	Модуль пружності для розрахунку E , МПа	Модуль пружності на зсув $E_{зс}$, МПа	Модуль пружності на розтяг E_p , МПа	Кут внутрішнього тертя φ , град	Питоме зчеплення c , МПа
1	Щільний гарячий асфальтобетон на бітумі БНД 60/90 (Тип А, Марка І)	5	3200	1800	4500	–	–
2	Щільний крупнозернистий гарячий асфальтобетон на бітумі марки (І) БНД 60/90	6	3200	1800	4500	–	–
3	Ресайклірована органічно-мінеральна суміш	18–26	800	–	–	–	–
4	Щебінь	0–8	350	–	–	–	–
5	Відсів	20	130	–	–	30,55	0,01
6	Суглинок легкий пилуватий, (J=7–12) 2–5мм. <40 %	–	50	–	–	6,67	0,02



Рис. 2. Дефекти на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу

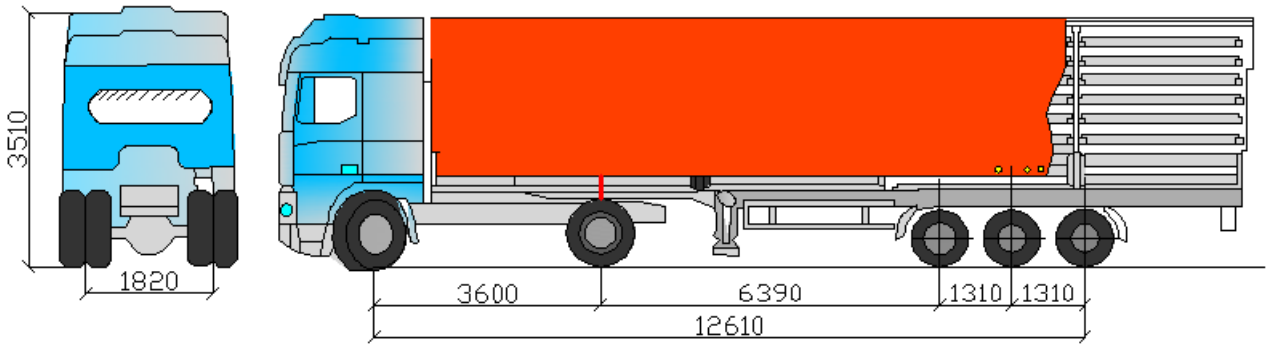


Рис. 3. Схема розстановки коліс автомобіля DAF-FT XF95 та напівпричепа Kögel – GN-24 у поздовжньому та поперечному напрямку

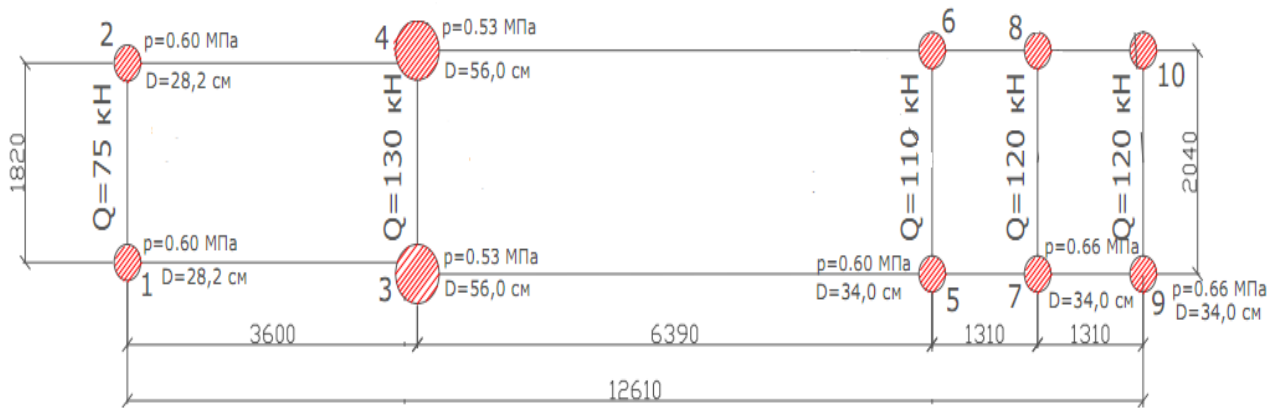


Рис. 4. Схема загальної розстановки коліс автопоїзда DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24

Розрахункова скінченно-елементна модель конструкції нежорсткого дорожнього одягу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу представлена на рис. 5.

Дискретна модель розрахункового фрагменту має розміри 40x19. Тобто: $S_1=M_1=1$; $S_2=M_2=19$; $S_3=M_3=40$. Кількість вузлів скінченно-елементної моделі становить 760, а кількість скінченних елементів – 702. Більш густа сітка виконана в зонах прикладання навантаження від коліс автотранспортного засобу. Погонний переріз покриття дорожнього одягу нежорсткого типу без врахування штучної основи у вигляді ресайклірованої органо-мінеральної суміші приводиться до еквівалентного по поздовжній EF і згинальній EI жорсткості.

Результати розрахунку НДС дорожніх одягів представлені у вигляді:

- ізополів реакцій ґрунту земляного полотна R^1 , кПа (рис. 6, а);
- ізополів вертикальних переміщень по осі Z1 глобальної системи координат (рис. 6, б);
- графіків розподілу реакцій ґрунту R^1 по поздовжньому та поперечному напрямках (рис. 7, 8 а, б, 9 а, б);
- графіків розподілу вертикальних переміщень u^1 по поздовжньому та поперечному напрямках, а саме: графік зміни вертикальних переміщень u_1 під віссю лівих коліс автопоїзда (рис. 10) та графік зміни вертикальних переміщень u_1 по всій ширині ділянки автомобільної дороги (рис. 11, а-г)

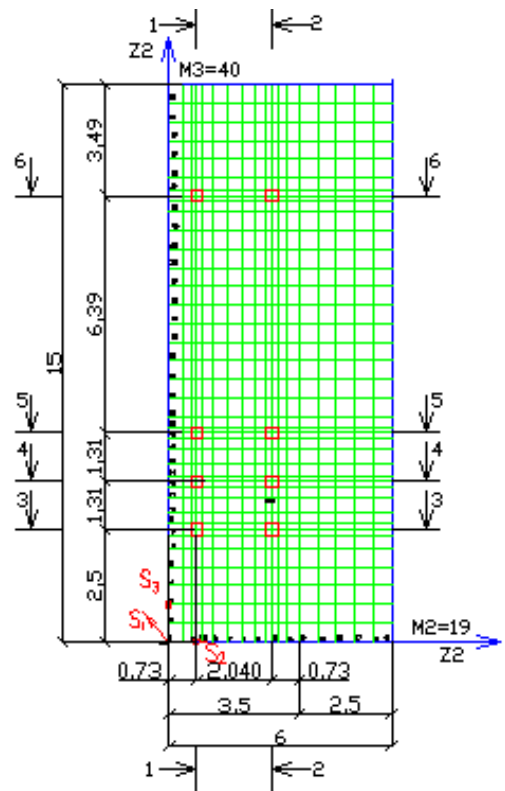


Рис. 5. Розрахункова скінченно-елементна модель конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400)

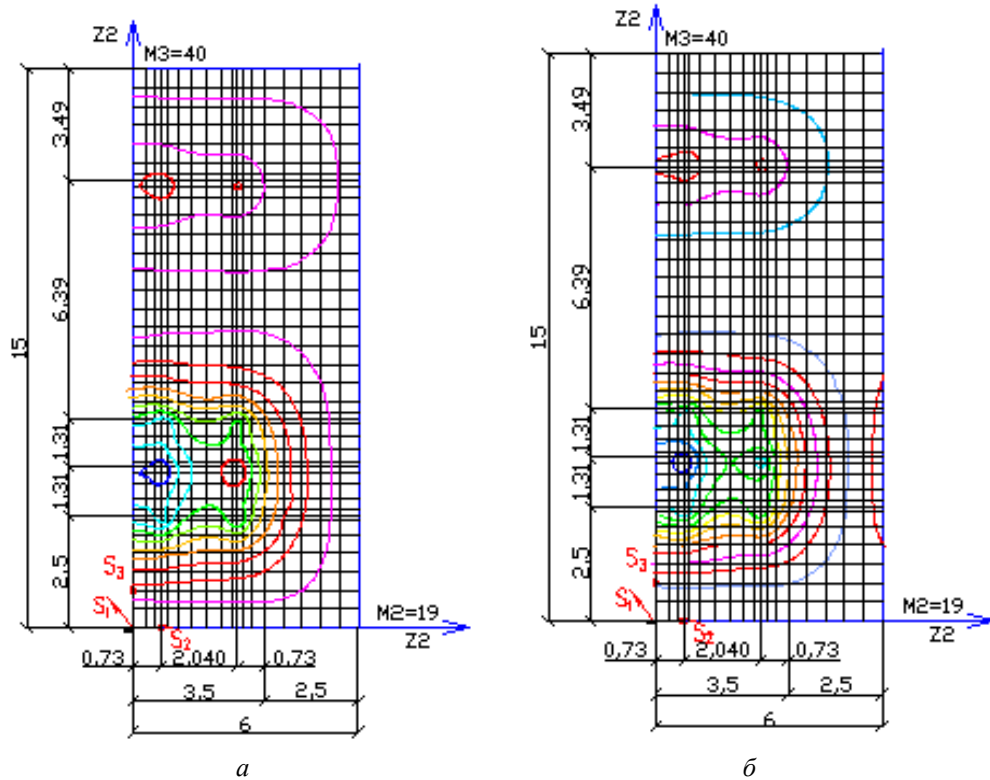


Рис. 6. Ізополя: *a* – реакції ґрунту земляного полотна R^1 , кПа; *б* – вертикальних переміщень u^1 , мм

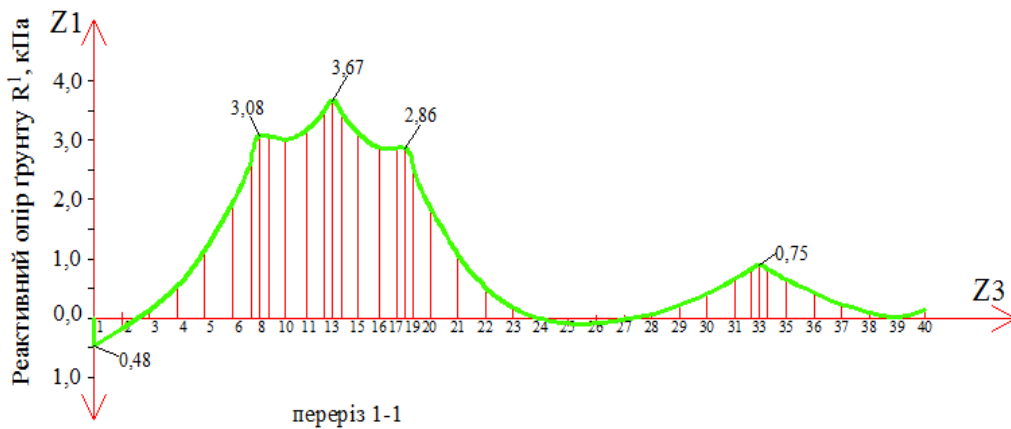


Рис. 7. Реакції ґрунту земляного полотна під віссю лівих коліс автопоїзда

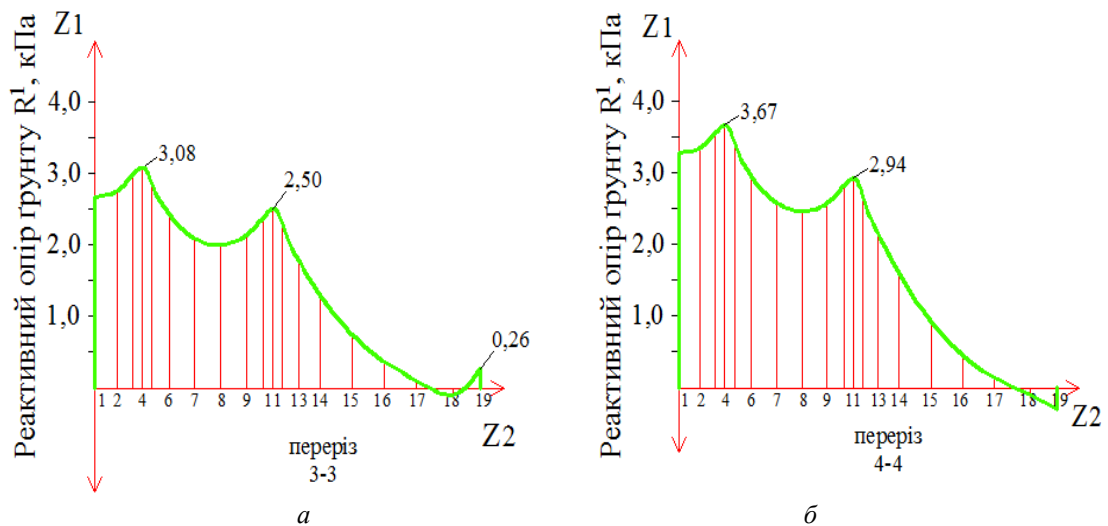


Рис. 8. Реакції ґрунту: *a* – під задньою віссю напівпричепа; *б* – під середньою віссю напівпричепа

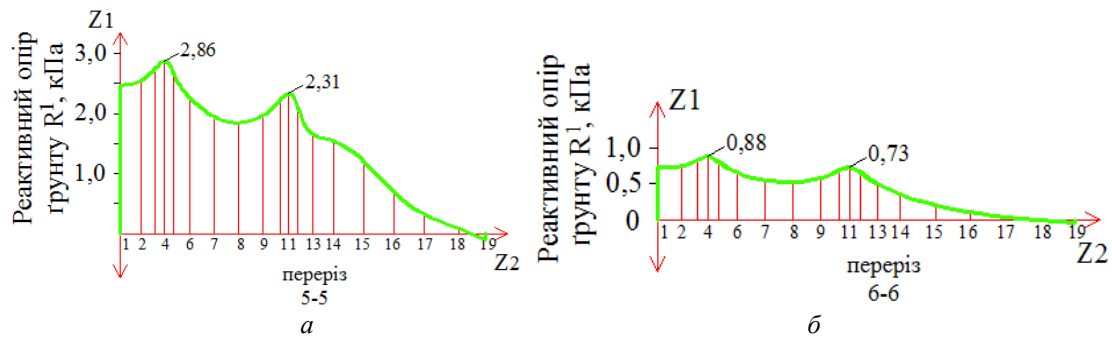


Рис. 9. Реакції ґрунту: *a* – під передньою віссю напівпричепа автопоїзда; *б* – під передньою віссю тягача

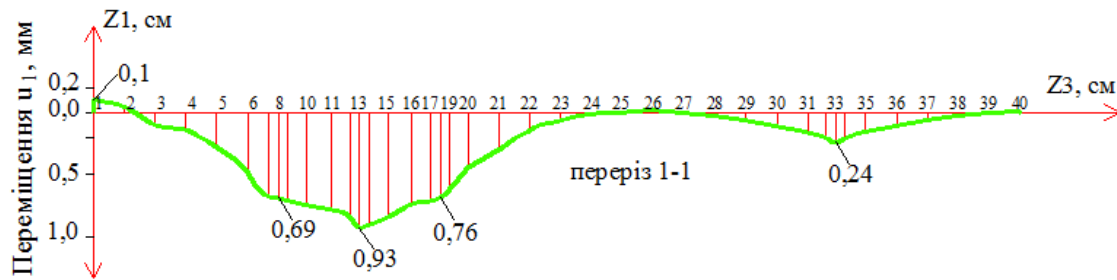


Рис. 10. Графік зміни вертикальних переміщень u^1 під віссю лівих коліс автопоїзда

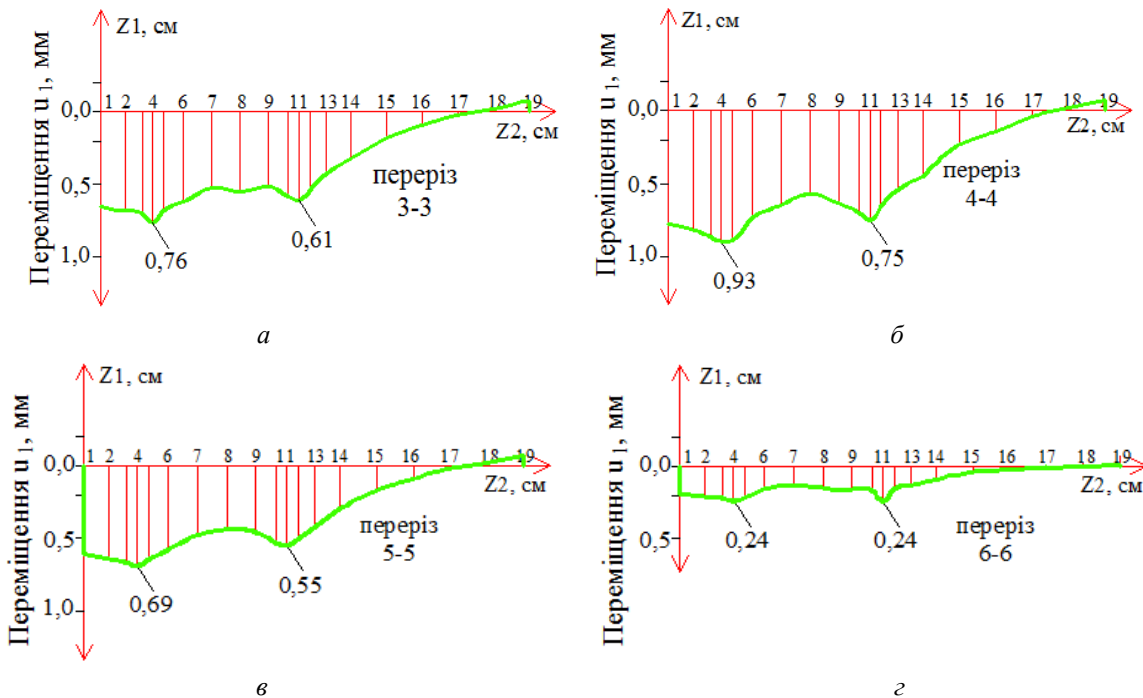


Рис. 11. Графік зміни вертикальних переміщень u^1 по всій ширині ділянки автомобільної дороги Київ-Ковель (при прикладанні однократного навантаження від автопоїзда DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24): *a* – під задньою віссю напівпричепа автопоїзда; *б* – під середньою віссю напівпричепа; *в* – під передньою віссю напівпричепа; *г* – під задньою віссю тягача

Аналіз рис. 6–11 показав, що максимальні, що максимальні реакції ґрунту земляного полотна R^1 та максимальні вертикальні переміщення u^1 виникають під відбитком лівого колеса середньої осі напівпричепа автопоїзда і досягають величин:

$$R^1 = -3,83 \text{ кПа та } u^1 = 0,93 \text{ мм.}$$

Відносні різниці між значеннями реакцій ґрунту земляного полотна під лівими і правими колесами автопоїзда складають:

- для перерізу 3–3 – 18,83 %;
- для перерізу 4–4 – 19,89 %;
- для перерізу 5–5 – 19,23 %;
- для перерізу 6–6 – 17,04 %.

Під віссю лівих коліс реакції ґрунту на 17–20 % є більшими, ніж під віссю правих коліс. Це пояснюється тим, що навантаження від автопоїзда відносно осі дороги є симетричним і в даному випадку має місце вплив навантаження на сусідній смузі руху (рис. 12). Одже, можна зробити висновок, дорожнє полотно просідає нерівномірно.

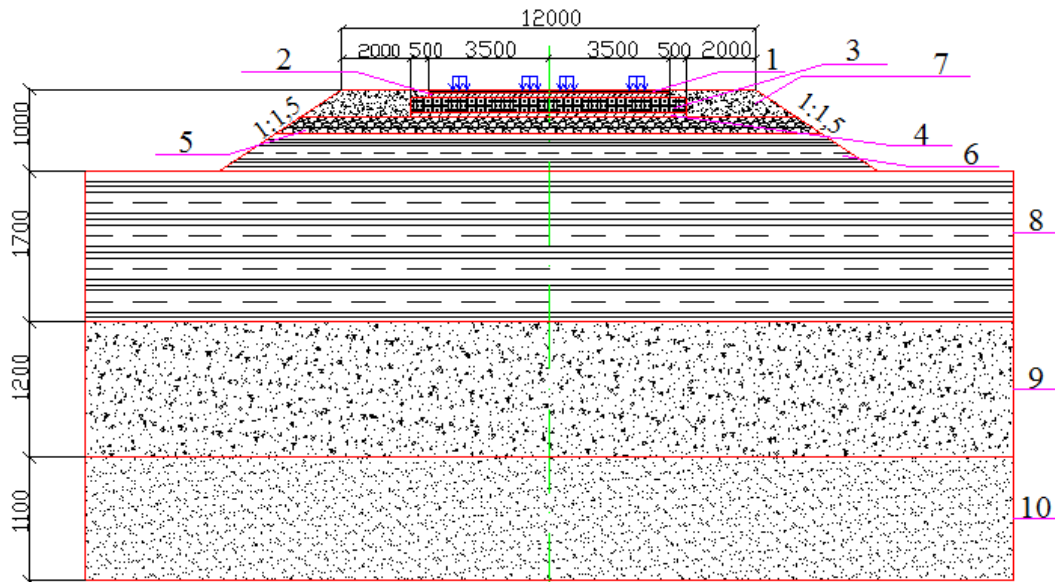


Рис. 12. Поперечний переріз дороги з активною ґрунтовою зоною: 1 – щільний асфальтобетон, $h=5$ см; 2 – крупнозернистий асфальтобетон, $h=6$ см; 3 – ресайкльована органо-мінеральна суміш $h=23$ см; 4 – щебінь, $h=6$ см; 5 – відсів, $h=20$ см; 6 – суглинок легкий, пілуватий (насип); 7 – піщано-гравійна суміш (обочина), $h=40$ см; 8 – суглинок легкий, пілуватий (основа), $h=170$ см; 9 – супісок пілувати, жовто-сірий, пластичний, $h=120$ см; 10 – пісок дрібний, рихлий

Під віссю лівих коліс вертикальні переміщення на 19–20 % більші, ніж під віссю правих коліс.

Через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) виявлено колійність та сітку тріщин в поздовжньому напрямку по смузі накату (рис. 13). Однією з причин виникнення даних дефектів є неправильне призначення товщини шару ресайкльованої органо-мінеральної суміші при укладанні основи, а

також фізична природа більшості дорожньо-будівельних матеріалів. З рис. 13 видно, що по осі смуги руху пошкодження дорожнього одягу не спостерігаються. Це можна пояснити тим, що діючі в Україні норми В.2.3 – 218 – 186 – 2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу» не враховують просторовий характер прикладання навантаження, а також не дають можливість визначити компоненти напружено-деформованого стану по всій ширині проїзної частини.



Рис. 13. Фотоматеріали дефектів на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – 302+400) через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу

6. Висновки

У результаті проведених досліджень було виявлено наступне:

1. Діючі в Україні нормативні документи на проектування дорожнього одягу нежорсткого типу не враховують просторовий характер прикладання навантаження та реальну взаємодію дорожньої конструкції з ґрунтовою основою.

2. Проблеми призначення оптимальної товщини регенованого шару в Україні приділено недостатню увагу.

3. Найбільш ефективним теоретичним методом розрахунку дорожнього одягу нежорсткого типу є МСЕ (а саме найбільш ефективний його варіант – МССЕ), який дозволяє врахувати багатшаровість конструкції, геометрію, просторовий характер при-

кладання навантаження та взаємодію з ґрунтовою основою.

Враховуючи вищенаведене, були розроблені алгоритм та математична модель, що увійшли до програмного комплексу KARTPK для виконання чисельного розрахунку конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу, відновленого за технологією холодного ресайклінгу, на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) на дію навантаження від автопоїзда DAF-FT XF95 + напівпричеп Kögel – GN-24. За результатами чисельного розрахунку встановлено, що

максимальні вертикальні переміщення і реакції ґрунту виникають під відбитком лівого колеса середньої осі напівпричепу автопоїзда і становлять: $u^1=0,93$ мм і $R^1=-3,83$ кПа. Через 8,5 років після виконання холодного ресайклінгу на ділянці автомобільної дороги Київ-Ковель (км 297+700 – км 302+400) виявлено колійність та сітку тріщин в поздовжньому напрямку по смузі накату під віссю лівих і правих коліс, що свідчить про неправильно прийняті рішення при призначенні товщини регенованого шару і надзвичайну важливість даної проблеми.

Література

1. Головка, С. К. Рациональные способы повторного использования асфальтобетону при реконструкции автомобильных дорог [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С. К. Головка. – К., 1998. – 203 с.
2. Беспалий, С. А. Удосконалення технології регенерації асфальтобетону на основі фена золи для ремонту і реконструкції автомобільних доріг [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С. А. Беспалий. – К., 2002. – 178 с.
3. Говоруха, О. В. Вдосконалення технології регенерації асфальтобетонів для ремонту і реконструкції автомобільних доріг [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / О. В. Говоруха. – Х., 2012. – 191 с.
4. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу [Текст]. – К.: Укравтодор, 2004. – 176 с.
5. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво [Текст]. – К.: Мінергіо-нбуд, 2015. – 91 с.
6. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст]. – М.: Министерство транспорта РФ, 2001. – 145 с.
7. Цыхановский, В. К. Расчет тонких плит на упругом основании методом конечных элементов [Текст] / В. К. Цыхановский, С. М. Козловец, А. С. Коряк. – К.: Сталь, 2008. – 234 с.
8. Шимановский, А. В. Теория и расчет сильнонелинейных конструкций [Текст] / А. В. Шимановский, В. К. Цыхановский. – К.: Сталь, 2005. – 432 с.
9. Баженов, В. А. Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды [Текст] / В. А. Баженов, А. С. Сахаров, В. К. Цыхановский // Прикладная механика. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 24–63.
10. Богомолов, В. О. Щодо необхідності розробки нової методики розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу [Текст] / В. О. Богомолов, В. К. Жданюк, С. В. Богомолов // Автошляховик України. – 2011. – № 1. – С. 23–26.
11. Матуа, В. П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Матуа. – Ростов-на-Дону, 2002. – 484 с.
12. Арсеньева, Н. О. Удосконалення методу розрахунку нежорстких дорожніх одягів з урахуванням критерію міцності асфальтобетонних шарів на зсув [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н. О. Арсеньева. – Х., 2014. – 212 с.
13. Talakh, S. Computational investigation of composed multilayered half-space strength under pavement [Text] / S. Talakh, O. Dubik // Proceedings of the National Aviation University. – 2015. – Vol. 64, Issue 3. – P. 97–104. doi: 10.18372/2306-1472.64.9030
14. Заворицкий, В. И. О расчёте методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния нежестких дорожных одежд [Текст]: маг. 7-го Всесоюз. сов. дорожн. / В. И. Заворицкий, А. В. Артёменко // Ускорение науч. -техн. прогресса, повыш. производ. труда и качества дор. работ. – М., 1981. – С. 9–10.
15. Шимановский, А. В. Оптимизация комбинированных пространственных систем [Текст] / А. В. Шимановский, В. К. Цыхановский, С. М. Талах. – К.: Сталь, 2012. – 462 с.
16. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности [Текст] / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Першаков В. М.

Дата надходження рукопису 23.12.2016

Талах Світлана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра реконструкції аеропортів та автошляхів, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058
E-mail: svetlanatalah@gmail.com

Дубик Олександр Миколайович, асистент, кафедра реконструкції аеропортів та автошляхів, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058
E-mail: saschadubik@ukr.net

Лисницька Катерина Миколаївна, асистент, кафедра реконструкції аеропортів та автошляхів, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058
E-mail: misslivets777e@ukr.net