

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРУ ПІДСИЛЕННЯ НА НДС ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ПРИ ПІД'ЇЗДІ ДО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

В роботі представлено результати впливу деформаційних характеристик шару підсилення на напружено-деформований стан залізничного насипу. Порівняльний МСЕ-аналіз дозволив з'ясувати, що такий тип підсилення не має позитивного впливу.

В работе представлены результаты влияния деформационных характеристик слоя усиления на напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи. Сравнительный МКЭ-анализ позволил выявить, что такой тип усиления не имеет положительного влияния.

In the article the results of influence of deformation descriptions of strengthening layer on the tensed-and-deformed state of railway embankment are presented. The comparative FEM-analysis has allowed finding out that such type of strengthening has no positive effect.

Багаточисленні типи підсилюючих елементів земляного насипу, полотна та основи, які базуються на зміні фізико-механічних властивостей ґрунту, хоча і мають розроблені конструкції, але не мають детальних досліджень їх впливу на напружено-деформований стан (НДС) земляного полотна [1, 2]. Ці дослідження повинні виконуватися для того, щоб з'ясувати, який варіант підсилення є найбільш оптимальним. Ця задача є актуальною з цієї позиції ще й тому, що вплив підсилюючих елементів не є однозначним і відомим.

Розроблені варіанти підсилення конструкції насипу та земляного полотна відрізняються наявністю в його тілі шарів із меншими деформаційними характеристиками. Це дозволяє зменшити вертикальні та горизонтальні переміщення верхньої будови колії (ВБК) і, таким чином, збільшити міжремонтні терміни і подовжити його нормальну експлуатацію.

Але з позиції НДС земляного полотна та насипу вплив цих елементів досліджено недостатньо, оскільки розрахунок неоднорідного насипу із зміною деформаційних характеристик

представляє деякі труднощі математичного характеру.

Для того, щоб науково обґрунтувати варіанти підсилення конструкції земляного полотна, проведено серію їх числових розрахунків з метою з'ясувати варіант із найбільш оптимальними характеристиками та найбільшою стійкістю, міцністю та стабільністю, які пов'язані із загальним напружено-деформованим станом (НДС) залізничного насипу.

Розрахунок НДС конструкцій насипу проводиться із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.31 R. 4 (SCAD).

Модель для розрахунку для більшого врахування реальних характеристик об'єкту, що досліджується, прийнята просторовою на основі об'ємних скінченних елементів (СЕ). Всі геометричні та деформаційні характеристики земляного полотна узяті із нормативних документів. На рис. 1 показана розрахункова схема земляного полотна, яка змодельована у комплексі SCAD.

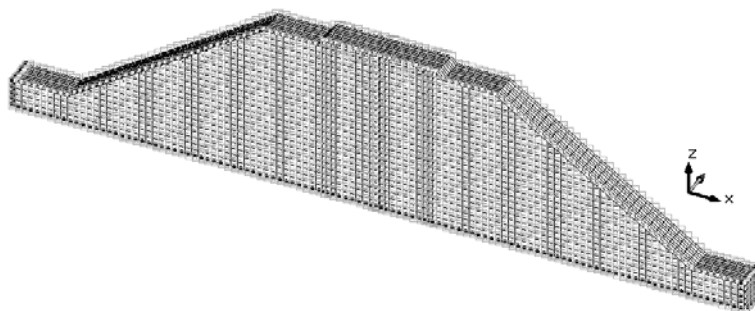


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна високого насипу

Загальна кількість вузлів схеми – 19940 шт. (біля 60 тисяч ступенів вільності), кількість скінчених елементів – 17073 шт. СЕ у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення. Розміри моделі: довжина (основа) – 55,7 м, ширина – 2,28 м, висота – 12,5 м (з яких висота земполотна – 10 м).

Розміри СЕ коливаються у межах $0,30 \times 0,5 \times 0,25$, $0,35 \times 0,5 \times 0,25$ до $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ м, тобто СЕ-сітка адекватна розмірам представленої моделі, оскільки вважається, що основний розмір СЕ не повинен перевищувати $1/20$ від характерного розміру моделі. У схемі застосовані як призматичні СЕ із трикутною основою (у моделюванні відкосу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земполотна та основи). Призматичні СЕ із трикутною основою перевірені на умови вироджених та «голчастих» елементів, кути трикутника не менше 45° [3].

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всім трьом осях X , Y та Z , по боках основи – заборона по осях X та Y , по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації). Верх та відкоси моделі вільні від граничних умов. Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими грунтами земляного полотна:

Жорсткість 1 – суглинок щільний, питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 30000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;

Жорсткість 2 – щебінь, питома вага $\gamma = 23,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 100000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;

Жорсткість 3 – залізобетонні шпали, питома вага $\gamma = 25,0 \text{ кН/м}^3$, приведений модуль пружності $E = 3,51 \cdot 10^7 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотивне, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 25 \text{ т}$) із урахуванням коефіцієнту динамічності $\mu = 1,25$ (рис. 2).



Рис. 2. Схема поїзного навантаження

На рис. 3 показано розташування навантажень 1-ої схеми на головній площадці насипу. Навантаження на ось локомотиву розподілене по ширині шпали, на яку воно приходиться, причому воно розподілене по 12-ти вузлах СЕ, які входять до геометричного місця розміщення шпали і складає $20,83 \text{ кН}$.

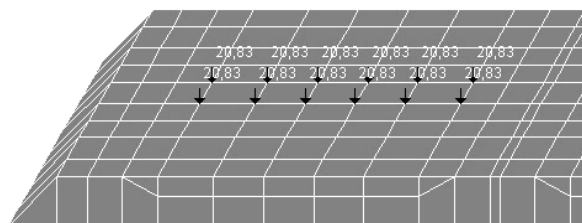


Рис. 3. Розташування навантажень на верхню будову колії (ВБК)

Було прийнято дві схеми завантаження СЕ-моделі:

1 схема – локомотив без додатку власної ваги земляного полотна;

2 схема – навантаження схеми лише власною вагою.

2-а схема навантаження надається для контролю переміщень та напружень в моделі, які викликані власною вагою земполотна, та тих же факторів від поїздного навантаження. Схема завантаження моделі на двох коліях не застосовувалася, оскільки на ділянці, що досліджується, випадків одночасного переміщення двох потягів не відбувається.

Усі геометричні розміри та загальні навантаження на модель зберігаються та контролюються у ході виконання розрахунку, що можливе у застосованому розрахунковому комплексі. Надана розроблена модель приймається як базовий контрольний варіант (Варіант 0), з яким в подальшому порівнюються інші варіанти розрахунків із зміненою конструкцією земляного полотна.

При розрахунку МСЕ застосовувався мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості із автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD.

Результатами розрахунку є загальні переміщення та напруження моделі по осях X та Z , причому нижченаведені результати показують характерну картину їх розподілення у земляному полотні.

На рис. 4 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїзним навантаженням (Варіант 0).

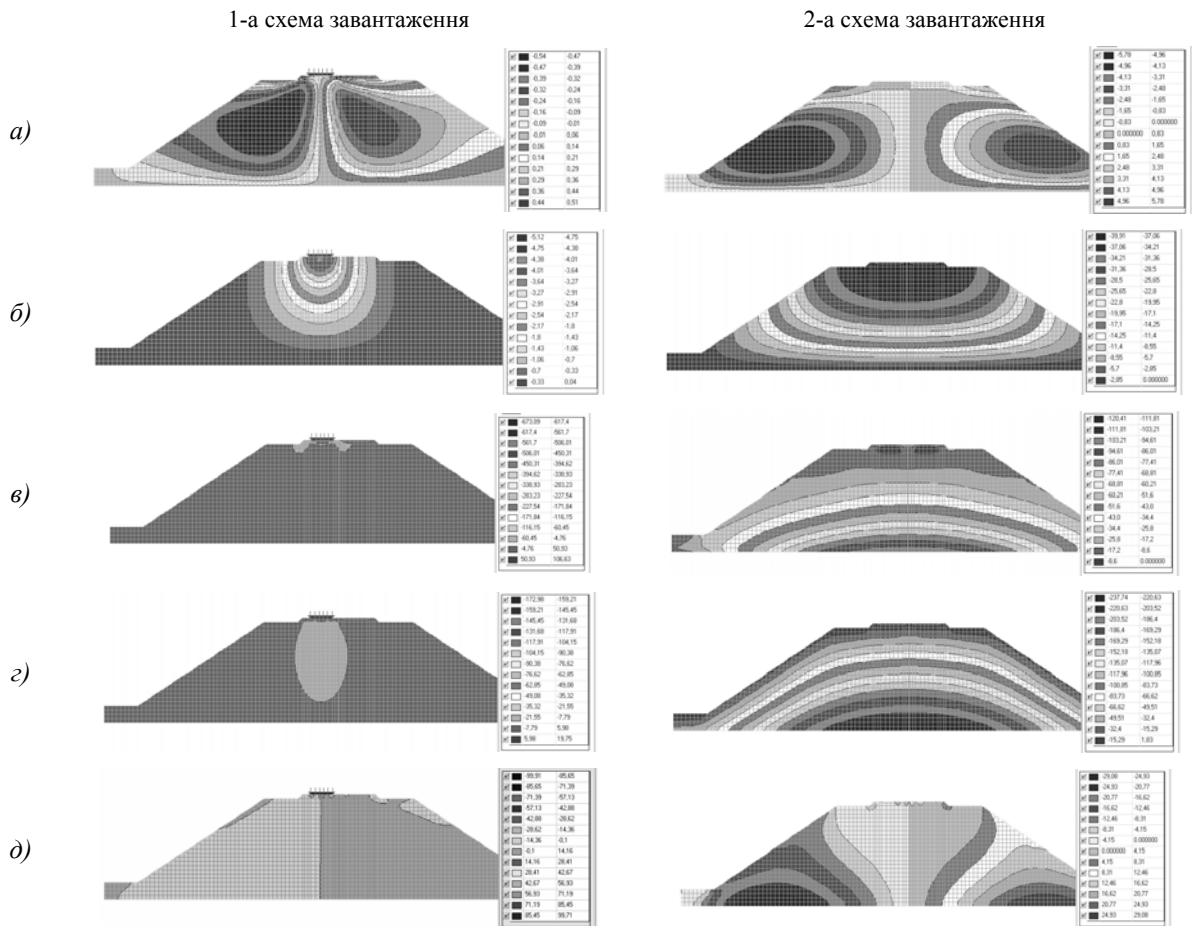


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0:

a) – переміщення по осі X (горизонтальна); *б)* – переміщення по осі Z (вертикальна); *в)* – нормальні напруження по осі X (горизонтальна); *з)* – нормальні напруження по осі Z (вертикальна); *д)* – дотичні напруження в площині XZ

В якості першого варіанту для дослідження взято варіант зміни конструкції земляного полотна із розміщенням в ньому шару з більшими деформаційними

характеристиками, наприклад, щебеню із бітумним просочуванням, конструкція земляного полотна показана на рис. 5, *a*.

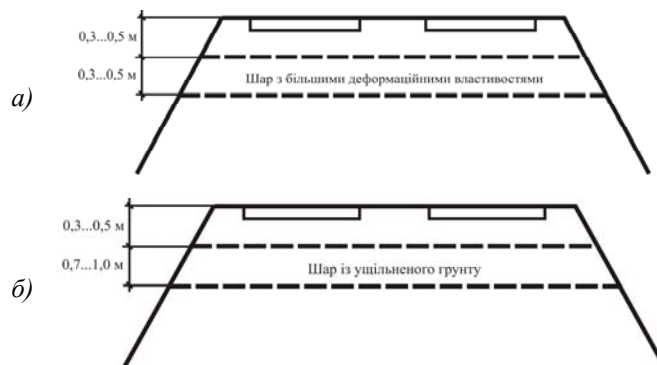


Рис. 5. Схема земляного полотна із шаром із збільшеними деформаційними характеристиками: *a)* – щебінь, просочений бітумом; *б)* – шар із збільшеними деформаційними характеристиками

Для дослідження Варіанту 1 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до деформаційних властивостей земляного полотна із збільшеними деформаційними властивостями. Відповідно до жорсткостей Варіанту 0 додалася жорсткість 4 – щебінь, просочений біту-

мом (товщина шару – 0,5 м): питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 80000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

В якості другого варіанту для дослідження узятю варіант зміни конструкції земляного полотна із розміщенням в ньому шару із ущільненого та більш міцного ґрунту з більшими деформаційними характеристиками, конструкція земляного полотна показана на рис. 5, б.

Для дослідження Варіанту 2 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до деформаційних властивостей земляного полотна із збільшеними деформаційними властивостями.

Відповідно до жорсткостей Варіанту 0 додалася жорсткість 4 – ущільнений ґрунт (товщина шару – 1 м): питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 40000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними. На рис. 6 наведені результати розрахунку моделі Варіанту 2.

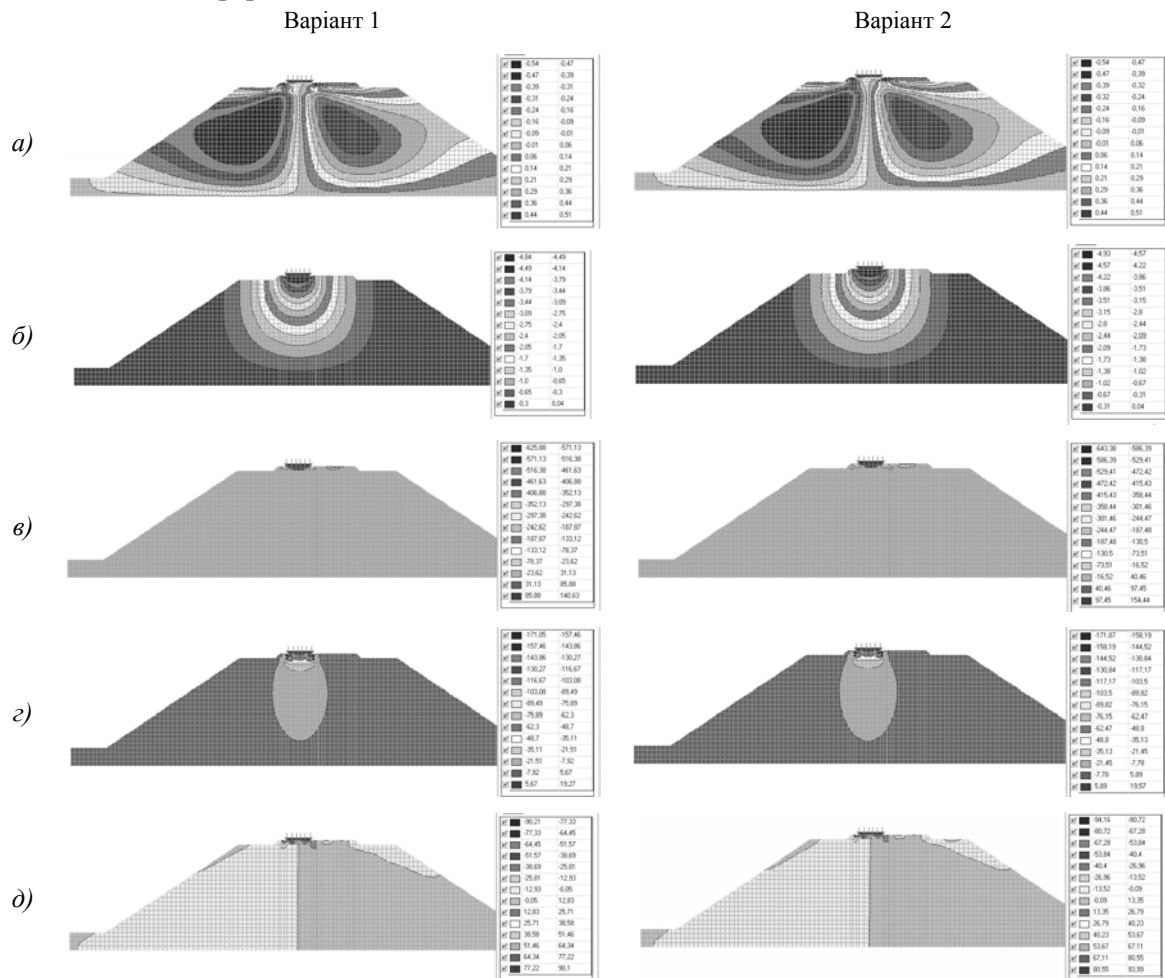


Рис. 6. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень 1-а схема завантаження:

а) – переміщення по осі X (горизонтальна); б) – переміщення по осі Z (вертикальна); в) – нормальні напруження по осі X (горизонтальна); з) – нормальні напруження по осі Z (вертикальна); д) – дотичні напруження в площині XZ

Таким чином, після проведених розрахунків трьох варіантів конструкції насипу, проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану Варіантів 1 і 2 з Варіантом 0, метою якого є з'ясування впливу конструктивних рішень підсилення конструкції земляного полотна на загальну поведінку насипу.

Із проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз НДС насипу з однорідного матеріалу у випадку 2-ої схеми завантаження (власна вага насипу) свідчить про те, що розподіл ізополів та ізоліній переміщень (рис. 4, а і б, 2-а

схема завантаження) і напружень (рис. 4, в-д, 2-а схема завантаження) близький до аналітичного, і це підтверджує вірність розробленої СЕ-моделі та її адекватність аналітичним рішенням. Відповідно до уявлень про деформування шаруватих середовищ із різними за величиною деформаційними характеристиками (зокрема, модулем пружності E), на границі шарів щебеню баластної призми та суглинку тіла насипу відмічаються зони невеликої концентрації напружень та якісної зміни їх ізополів (рис. 4, в, 2-а схема завантаження) – ізополе із значенням напруження – $8,6 \text{ кН/м}^2$ ($0,0086$

МПа) та рис. 4, з, 2-а схема завантаження – викривлення ізополія із значенням напруження – $15,29 \text{ кН/м}^2$ ($0,0153 \text{ МПа}$) на межі розділу шарів щебеню та суглинку). Загальний напружений стан насипу при дії власної ваги позначений невеликим рівнем напружень (максимальні напруження – $0,12 \dots 0,2 \text{ МПа}$ (рис. 4, в, з), а максимальне переміщення верху моделі складає $39,9 \text{ мм}$ (рис. 4, а). Таким чином, аналіз НДС насипу при дії власної ваги свідчить про те, що розроблена модель відповідає вимогам до скінченно-елементних моделей і надає можливість отримання результатів розрахунку достатньої точності.

2. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 1 свідчить про те, що введення в тіло насипу шару з більшими на відміну від матеріалу земляного полотна деформаційними характеристиками змінює картину вертикальних переміщень, дещо їх зменшуючи. Це виходить із аналізу вертикальних переміщень, максимальне значення яких у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 1 – $4,84 \text{ мм}$ (рис. 6, б), тобто зменшення переміщень незначне (в $1,05$ разу), причому горизонтальні переміщення в двох варіантах не змінилися. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 1, слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 6, б) – ізополія під шпалою. Напружений стан Варіанту 1 на відміну від Варіанту 0 дещо покращився: так, горизонтальні напруження дещо зменшилися (з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $625,88 \text{ кН/м}^2$ ($0,625 \text{ МПа}$) у Варіанті 1) та в Варіанті 1 зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 6, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 6, з, д). Картина розподілу вертикальних напружень якісно майже однакова у двох варіантах (рис. 4 та 6, б), а зменшення напружень незначне ($1,02 \dots 1,05$ разу).

3. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 2 свідчить про те, що введення в тіло насипу шару ущільненого ґрунту змінює картину вертикальних переміщень, також дещо їх зменшуючи, як і у Варіанті 1. Максимальне значення вертикальних переміщень у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 1 – $4,93 \text{ мм}$ (рис. 6, б), тобто зменшення переміщень незначне, горизонтальні переміщення в двох варіантах не змінилися, як і у Варіанті 1. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 2, також слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 6, б). Напружений стан Ва-

ріанту 2 на відміну від Варіанту 0 дещо покращився: так горизонтальні напруження дещо зменшилися (з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $643,38 \text{ кН/м}^2$ ($0,643 \text{ МПа}$) у Варіанті 2) та в Варіанті 2, як і у Варіанті 1, зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 6, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 6, з, д) в $1,02$ разу в середньому). Картина розподілу вертикальних напружень якісно майже однакова у двох варіантах (рис. 4 та 6, б), а зменшення напружень незначне ($1,01 \dots 1,03$ разу).

Після проведеного порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена просторова СЕ-модель насипу дозволила провести ряд числових розрахунків, результати яких після порівняльного аналізу дали змогу свідчити про вплив на загальний НДС земляного полотна при зміні конструкції для його підсилення.

2. Порівняльний аналіз варіантів підсилення шляхом розміщення в тілі насипу шарів з більшими на відміну від матеріалу земляного полотна деформаційними характеристиками (Варіант 1) або шару ущільненого ґрунту (Варіант 2) свідчить про те, що така зміна незначно покращує загальний НДС насипу, дещо зменшуючи вертикальні переміщення та компоненти напружень, але це зменшення незначне ($1,02 \dots 1,05$ разу).

3. Аналіз Варіанту 1 свідчить, що його впровадження більш ефективно на відміну від Варіанту 2, оскільки зменшення переміщень та напружень для цього варіанту більше, хоча в абсолютних величинах все ж незначне (максимальне $1,05$ разу).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії [Текст] : ЦЮ 25.12.2008 р., реєстр. номер ЦП-0204 / В. Д. Петренко та ін. – К.: Укрзалізниця. Гол. упр. колійного госп., 2009. – 44 с.
2. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії [Текст] : ЦП/0084. – К., 2002. – 156 с.
3. SCAD для користувача [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2010.

Прийнята до друку 03.03.2010.