

В. Д. ПЕТРЕНКО, В. Т. ГУЗЧЕНКО, О. Л. ТЮТЬКИН, А. М. М. АЛХДУР (ДІПТ),
В. В. КОВАЛЕВИЧ (СЕП плюс, Дніпропетровськ)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НДС ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ

В статті наведені результати порівняльного аналізу напружено-деформованого стану земляного полотна при модернізації (виконання протидеформаційних заходів).

Ключові слова: земляне полотно, модернізація, протидеформаційні заходи, напружено-деформований стан

В статье приведены результаты сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния земляного полотна при модернизации (выполнение противодеформационных мероприятий).

Ключевые слова: земляное полотно, модернизация, противодеформационные мероприятия, напряженно-деформированное состояние

In the article the results of comparative analysis of the tensed and deformed state of earthen linen during modernization are resulted (measures against deformation).

Keywords: earthen linen, modernization, measures against deformation, tensed and deformed state

Зростаючі обсяги будівництва залізниць в Україні відкривають нові задачі в області будівництва та експлуатації колії і земляного полотна. Відомо, що окрім об'ємів будівництва також збільшуються об'єми ремонту та реконструкції земляного полотна, у тому числі і при модернізації під швидкісний рух. Таке збільшення об'ємів потребує запровадження нових технічних рішень щодо зменшення деформацій основного майданчика земляного полотна і, відповідно, збільшення термінів його нормальної експлуатації.

Запроваджені нові рішення, які полягають як у підсиленні земляного полотна геосинтетичними матеріалами, так і у зміні його поперечного профілю із утворенням берм, банкетів та контрбанкетів, потребують наукового обґрунтування. Причому, порівняння рішень із подальшою їх оптимізацією потребує комплексного аналізу різних параметрів, таких як міцність земляного полотна, яка забезпечує термін експлуатації, і грошових витрат на перевлаштування та реконструкцію земляного полотна.

Комплексність аналізу та подальшої оптимізації параметрів земляного полотна забезпечує залучення при розгляді конкретної ситуації більшого об'єму вхідної інформації, що дозволяє отримати більш обґрунтовані рішення для виконання реконструкції.

Метою наданої роботи є комплексна оптимізація параметрів земляного полотна при реконструкції на Донецькій залізниці, яка полягає у пошуку та обґрунтуванні техніко-економічних та міцнісних параметрів насипу при рекон-

струкції із вибором на основі цих результатів оптимального варіанту, що є актуальною задачею.

Земляне полотно – один з найважливіших елементів колії, який виконаний з ґрунту й оснований на ґрунті [1-3]. Воно буває у вигляді насипів, виїмок і нульових місць. На косогорах зустрічаються також напівнасипи, напіввиїмки й напівнасипи – напіввиїмки, у яких основна площадка утворена частково підсипанням, частково урізанням в ґрунт земної поверхні.

Поперечним профілем земляного полотна називається переріз, перпендикулярний його поздовжній осі і показується на ширину всієї смуги відводу [1, 4].

Земляне полотно повинне бути міцним, стійким і довговічним, що вимагає мінімуму витрат на його обладнання, утримування і ремонт й забезпечує можливість широкої механізації робіт. Однією із причин безумовності виконання зазначених вимог є те, що земляне полотно в системі колійного господарства складає найбільш фондоемну частину: в основних фондах колійного господарства вартість земляного полотна досягає 29 % [4].

Поверхня земляного полотна й смуги відводу повинна бути спланована так, щоб вода ніде не застоювалася, а мала б вільний і швидкий відтік від земляного полотна в боки або в спеціальні водовідвідні пристрої. Якщо ця умова де-небудь порушиться, то земляне полотно в цьому місці неминуче піддається деформації, яка може створити загрозу безпеці руху поїздів.

Земляне полотно будується за типовими поперечними профілями або індивідуальними проектами (ДБН В.2. – 2008 «Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм»).

Земляне полотно та його споруди повинні забезпечувати безпеку руху поїздів із заданими навантаженнями й швидкостями при встановленій вантажнапруженості. Земляне полотно, його елементи та споруди повинні відповідати нормативам міцності та стійкості протягом всього періоду служби.

У земляному полотні та його спорудах можуть виникати й накопичуватися дефекти, деформації та пошкодження [5]. Дефекти є наслідком недоробок під час проектування земляного полотна, його захисних і укріплювальних споруд, порушення технології будівельного процесу й тимчасової експлуатації залізничних ліній, незадовільного поточного утримання й неякісних ремонтів колії.

Деформації земляного полотна та його споруд виникають: при недостатній несучій здатності ґрунтів, з яких воно зведене; невідповідності потужності верхньої будови колії навантаженням від рухомого складу, що обертається; недостатньому захисті ґрунтів земляного полотна від несприятливих впливів кліматичних та інженерно-геологічних факторів. Низька якість поточного утримання земляного полотна та його споруд, коли не забезпечується відведення поверхневих і ґрунтових вод, несвоєчасно усуваються дрібні дефекти земляного полотна та його споруд, не ліквідовуються причини зниження несучої здатності ґрунтів, призводять до переростання дрібних дефектів і пошкоджень у небезпечні деформації, що загрожують безпеці руху поїздів.

Під пошкодженням розуміють несправність земляного полотна та його споруд, що сталася під час експлуатації під впливом несприятливих природних умов, внаслідок ненормальних, непередбачених характером роботи дій, взаємодії зі сторонніми конструкціями.

Дефекти, деформації та пошкодження земляного полотна та його споруд підлягають усуненню в процесі поточного утримання колії, при планово-запобіжних ремонтах верхньої будови колії, а також при ремонтах і підсиленні земляного полотна за індивідуальними проектами. Однією з пропозицій протидеформаційних заходів є суцільна вирізка. Роботи по суцільній вирізці виконуються під час вікна при закритих коліях. До початку основних робіт по непарній колії демонтуються ланки рейкошпальної решітки. Потім під час вікна ведеться

демонтаж інвентарних рейок і виконання суцільної вирізки. Глибина вирізки по непарній колії прийнята виходячи з глибини баластних заглиблень. По парній колії глибина суцільної вирізки прийнята конструктивно на таку саму відмітку як і по непарній.

Зворотна засипка виконується з пошаровим ущільненням і влаштовується із щебеню або щебеневої суміші. Розмір фракцій щебеню у суміші 0,0625...50 мм. Кількість пилюватих частинок розміром <0,0625 мм не повинна перевищувати 5 % від об'єму, розміром 2...20 мм до 40 %, решта 55 % приходить на фракцію 20...50 мм.

При виконанні ремонту верхньої будови колії геотекстиль вкладається на основній площині з ухилом 0,04 в польову сторону з перекриттям одного шару іншим не менше ніж 100 мм. Геотекстиль – це нетканий матеріал із поверхневою щільністю $\geq 280 \text{ г/м}^2$, міцністю на розтягування не менше 20 кН/м; міцністю при відносному подовженні на 390 – не менше ніж 10 кН/м; відносне подовження при руйнуванні не більше 20 %. Після вкладання рейкошпальної решітки проводиться баластування колії. Укріплення укосів земляного полотна виконується шляхом відсипання однополочної віджимної берми з виположенням укосів земляного полотна 1:2. Пригрузочна віджимна берма влаштовується з використанням щебеню крупністю 40...70 мм та міцністю на стиск 800...1200 МПа. Відсипка віджимної берми здійснюється пошарово з ущільненням шару товщиною 0,2...0,3 м. Середня висота полиць віджимної берми складає 5,0 м з ухилом верху полиці 2,0 ‰ в бік проектною водовідвідної канави. В якості матеріалу берми використовується місцевий ґрунт. Для виведення води з хворої ділянки через залізобетонну трубу по непарній стороні колії необхідно створити берму та канаву шириною 1,5 м та висотою 0,6 м з виположенням укосів 1:2.

Другим варіантом є виконання бортової вирізки. Двостороння бокова зрізка баластових заглиблень здійснюється від лінії по торцях шпал в бік укосу насипу, з подальшою заміною зрізаного матеріалу чистим щебенем крупністю 40...70 мм та міцністю на стиск 800...1200 МПа. Товщина шару 0,2...0,3 м. Всі роботи необхідно проводити в довготривалі вікна.

Для забезпечення стійкості укосів насипу запроєктовано виположення укосів насипу до 1:2 та відсипку привантажної віджимної берми, яка влаштовується з використанням щебеню

крупністю 40...70 мм. Її відсіпка здійснюється шарово з ущільненням шару товщиною 0,2...0,3 м. Середня висота полиць віджимної берми складає 5,0 м з ухилом верху полиці 2,0 ‰ в низову сторону.

Зі сторони непарної колії по підшві приватної віджимної берми влаштовується берма шириною 6,0 м з ухилом 2,0 ‰ в бік проекційної водовідвідної канами. В якості матеріалу берми використовується місцевий ґрунт, отриманий після нарізки уступів та робіт по бортовій вирізці.

Техніко-економічне порівняння двох варіантів протидеформаційних заходів проводилося на основі комплексу АВК-3. На основі цих матеріалів зроблено наступні висновки.

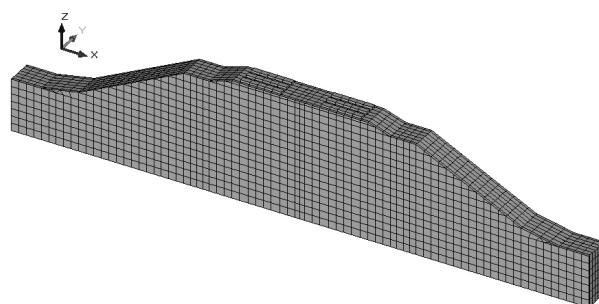
Зведений кошторисний розрахунок вартості будівництва основних обсягів робіт та матеріалів при виконанні робіт по суцільній вирізці становить – 3868,0 тис. грн. Договірна ціна складається з будівельних робіт, що в свою чергу становлять 2219, 7 тис. грн., монтажних робіт – 15,3 тис. грн., та інших витрат – 1633,3 тис. грн. Кошторисна вартість будівництва – 1746,9 тис. грн., кошторисна трудомісткість – 62,9 тис. люд-год., кошторисна заробітна плата – 915,6 тис. грн., середній розряд робіт – 3, 4, разом по кошторису – 3223,6 тис. грн., податок на додану вартість (ПДВ) (20 %) – 644,7 тис. грн.

Зведений кошторисний розрахунок вартості будівництва основних обсягів робіт та матеріалів при виконанні робіт по бортовій вирізці становить – 1235,9 тис. грн. Договірна ціна складається з будівельних робіт, що в свою чергу становлять 670,5 тис. грн., монтажних робіт – 15,3 тис. грн., та інших витрат – 550,1 тис. грн. Кошторисна вартість будівництва – 515,9 тис. грн., кошторисна трудомісткість – 21,9 тис. люд-год., кошторисна заробітна плата – 291,4 тис. грн., середній розряд робіт – 2, 5, разом по кошторису – 1029,9 тис. грн., податок на додану вартість (ПДВ) (20 %) – 205,9 тис. грн.

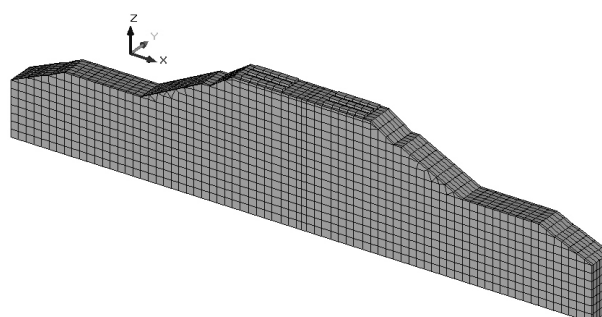
Розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) двоколіїного насипу із застосуванням декількох варіантів реконструкції (суцільна та бортова вирізка) проводиться із застосуванням методу скінчених елементів за допомогою розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD) [6, 7]. Всі геометричні та деформаційні характеристики земляного полотна узяті із нормативної документації. Модель для розрахунку прийнята просторовою на основі об'ємних скінчених

елементів (СЕ) для більшого врахування реальних характеристик об'єкту, що досліджується. На рис. 1. показана розрахункова схема земляного полотна до реконструкції, реалізована у комплексі SCAD [7].

Земляне полотно до реконструкції



Суцільна вирізка



Бортова вирізка

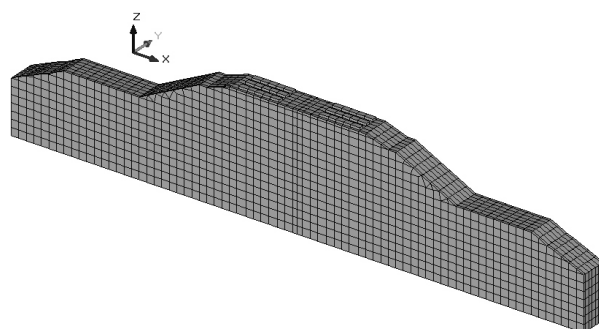


Рис. 1. СЕ-схеми земляного полотна

Загальна кількість вузлів схеми – 8 632 шт. (біля 26 тисяч ступенів волі), кількість скінчених елементів – 7 016 шт. (до реконструкції); 8 280 (біля 24 тисяч ступенів волі) та 6 722 (суцільна вирізка); 8 126 (біля 25 тисяч ступенів волі) та 6 582 (бортова вирізка). СЕ у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення. Розміри моделі: довжина (основа) – 38,46 м, ширина – 1,8 м (для всіх моделей), висота – 8,0 м (з яких висота земляного полотна, як і в інших варіантах – 4,5 м).

Розміри СЕ коливаються у межах 0,30×0,5×0,5, 0,35×0,5×0,5 до 0,5×0,5×0,5 м, тобто СЕ-сітка адекватна розмірам представле-

ної моделі, так як 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 60° .

На схему накладені граничні умови:

- 1) понизу моделі заборона переміщення по всім трьом осям X , Y та Z ;
- 2) по боках основи – заборона по осях X та Y ;
- 3) по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умови плоскої деформації). Верх та відкоси моделі від граничних умов вільні.

Деформаційні характеристики обрані із таблиці у відповідності із дослідженими ґрунтами земляного полотна [8]:

Шар 1 – суглинок насипу, густина $\rho = 2,0$ т/м³, модуль пружності $E = 25$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;

Шар 2 – щебінь, густина $\rho = 2,4$ т/м³, модуль пружності $E = 100$ МПа, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,25$;

Шар 3 – залізобетон шпали, густина $\rho = 2,5$ т/м³, модуль пружності $E = 1 \cdot 10^6$ МПа, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,2$.

Представлений шаруватий масив повторює з незначними відхиленнями реальне земляне полотно, але товщина шарів прийнята постійною, хоча в дійсності вона незначно змінюється.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотив, який знаходиться однією парою коліс над шпалою, тобто $P = 25$ т. Тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 20$ т) із урахуванням коефіцієнту динамічності $\mu = 1,25$. Була прийнята одна схема завантаження СЕ-моделі – локомотив знаходиться на двох коліях. На рис. 2. показано розташування навантажень на головній площадці насипу. Навантаження на ось 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 кН ($250/12 = 20,83$ кН).

Усі геометричні розміри та загальні навантаження на модель зберігаються та контролюються у ході виконання розрахунку, що можливо у застосованому розрахунковому комплексі.

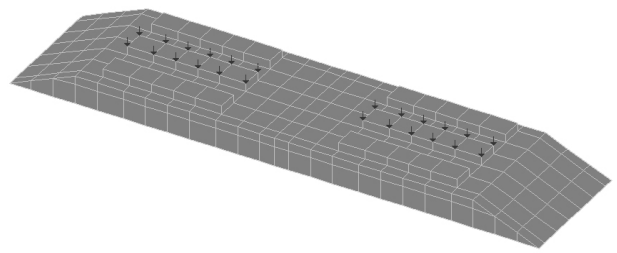


Рис. 2. Розташування навантажень на верхню будову колії (ВБК)

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

Перед тим, як перейти до аналізу отриманих результатів та вибору оптимального рішення реконструкції, слід відмітити, що у скінченно-елементній моделі суцільної вирізки не був врахований елемент геосинтетичного матеріалу. Це відбулося за двох причин. По-перше, полотно геосинтетичного матеріалу при просторовій постановці, при якій модель створюється із об'ємних скінчених елементів, із-за різної метрики (полотно – $2D$, а земляне полотно – $3D$) некоректно взаємодіє із земляним полотном. По-друге, перше порівняння отриманих результатів свідчить про те, що і без підсилення геосинтетичним матеріалом, різниця між варіантами незначна і вплив геосинтетика йде до запасу міцності.

На рис. 3. і 4 наведені результати деформацій в різних варіантах земляного полотна із поїздом навантаженням (надається лише половина моделі, що обґрунтовується симетрією схеми та навантаження).

Аналіз переміщень по осі X (див. рис. 3) надає змогу зробити висновок, що кількісно всі три випадки (до реконструкції та два варіанти земляного полотна, що реконструйоване) не мають значних змін: максимальні горизонтальні переміщення складають 1,1 мм. Слід відмітити, що при кількісній тотожності результатів, якісно вони відрізняються, що видно при порівнянні розподілення ізополів та ізоліній.

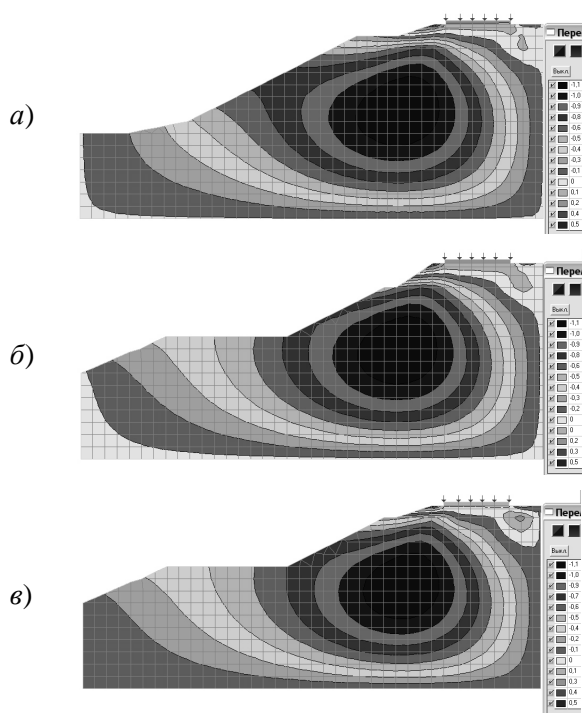


Рис. 3. Ізолінії та ізополя переміщень по осі X (горизонтальна):

a – до реконструкції; *б* – суцільна вирізка; *в* – бортова вирізка

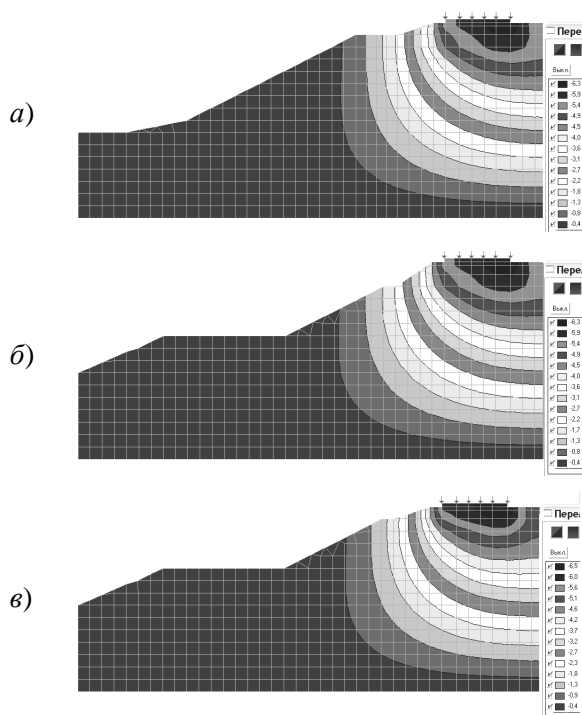


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна):

a – до реконструкції; *б* – суцільна вирізка; *в* – бортова вирізка

Слід відмітити, що при кількісній тотожності результатів, якісно вони відрізняються, що видно при порівнянні розподілення ізополів та ізоліній. У випадку суцільної вирізки (див. рис.

3, *б*) ізополя горизонтальних напружень на лінії симетрії моделі не зливаються у суцільне поле. Тобто при дії двох локомотивів, які знаходяться на сусідніх коліях, у випадку суцільної вирізки їх вплив діє лише на відповідну колію. У випадку ж бортової вирізки нижче правого кінця шпали утворюється замкнута зона із значенням 0,3 мм, яка відсутня як у випадку насипу до реконструкції, так і у випадку суцільної вирізки. Це пояснюється тим, що поперечний профіль земляного полотна після реконструкції значно змінився. Але значення горизонтальних переміщень у випадку бортової вирізки малі і не дають змоги свідчити про якісь негативні наслідки.

Переміщення по осі Z (див. рис. 4) майже ідентичні якісно та кількісно: максимальні вертикальні переміщення складають 6,3 мм (у випадку бортової вирізки – 6,5 мм). Такі значення переміщень є нормативними і дають змогу свідчити, що всі три моделі майже ідентичні.

На рис. 5. і 6 наведені результати деформацій в різних варіантах земляного полотна.

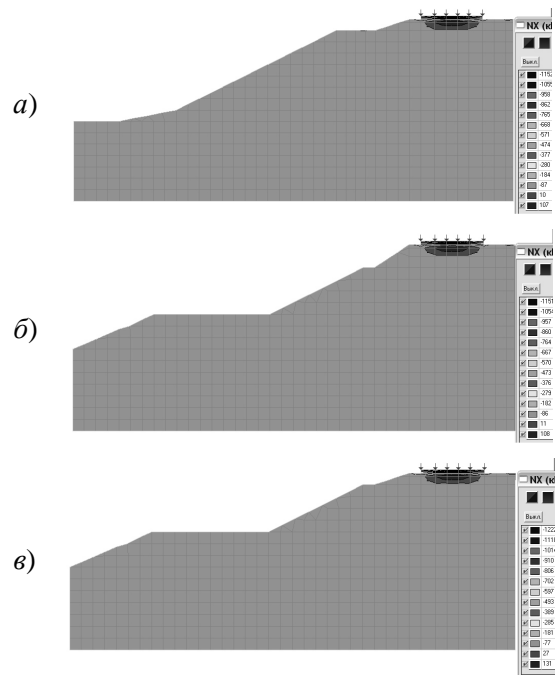


Рис. 5. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі X (горизонтальна):

a – до реконструкції; *б* – суцільна вирізка; *в* – бортова вирізка

При аналізі напружень по осі X (див. рис. 5) з'ясовано, що вони є майже ідентичними, що пояснюється незначною зоною їх поширення (близько 0,5 м під шпалую) і мінімальним впливом технічних рішень. Можна відмітити, що в зоні розтягу під рейкою у випадку бортової вирізки напруження дещо збільшені

(+0,13 МПа на відміну від +0,1 МПа у випадку суцільної вирізки), але незначно.

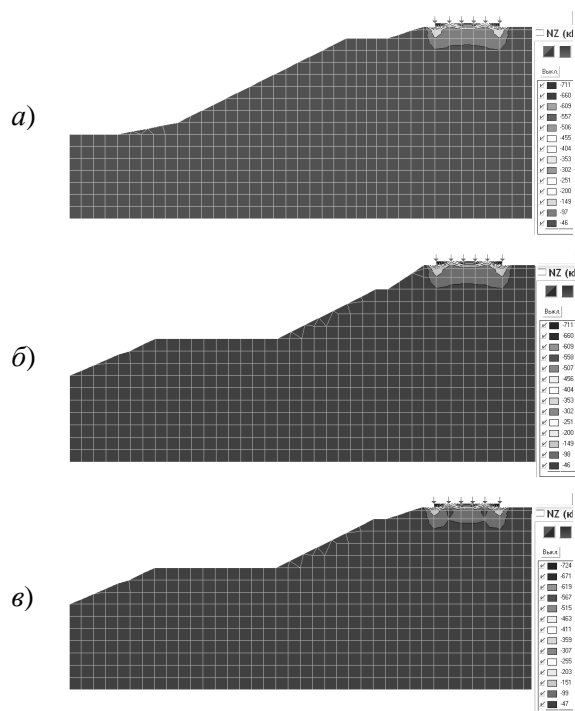


Рис. 6. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі Z (вертикальна):

а – до реконструкції; б – суцільна вирізка; в – бортова вирізка

Аналіз напружень по осі Z (див. рис. 6) свідчить, що вони також є майже ідентичними, але зона їх поширення збільшується (близько 0,9...1,0 м під шпалою), тому слід пам'ятати, що у випадку бортової вирізки поширення напружень досягне суглинку земляного полотна тому, що товщина щебеню зменшена з 1,0 до 0,4...0,5 м. Але значення напружень незначні (соті долі мегапаскаля), тому можна відмітити, що експлуатаційний стан буде забезпечено.

Висновки

1) Проведене техніко-економічне порівняння обох варіантів реконструкції земляного полотна на основі спеціалізованого комплексу АВК-3 і з'ясовано, що кошторисна вартість будівництва основних обсягів робіт та матеріалів при виконанні робіт по бортовій вирізці становить – 1235,9 тис. грн. Кошторисна вартість будівництва основних обсягів робіт та матеріалів при виконанні робіт по суцільній вирізці

становить – 3868,3 тис. грн., що втричі дорожче в порівнянні з бортовою вирізкою.

2) Розроблено скінчено-елементні моделі земляного полотна до реконструкції по двох варіантах реконструкції, проведено їх розрахунки, після чого отримано результати напружено-деформованого стану, які дозволили оцінити з позиції міцності вплив обох технічних рішень.

3) Аналіз НДС свідчить про те, що при реконструкції можливо застосовувати обидва технічні рішення, які є майже ідентичними, і варіант як суцільної, так і бортової вирізки є доцільним з позиції НДС та подальшої експлуатації. Також аналіз НДС довів, що у випадку суцільної вирізки в даному конкретному випадку підсилення геосинтетичним матеріалом є недоцільним.

4) Основним висновком після комплексного аналізу є те, що варіант бортової вирізки є оптимальним як із умов техніко-економічного порівняння з позиції міцності та стійкості.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Рувинский, В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна [Текст] / В. И. Рувинский. – М.: Транспорт, 1982. – 166 с.
2. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України [Текст] / Л. І. Дяченко, П. П. Кислий, В. О. Кулач. Затверджено наказом Укрзалізниці від 08.05.2001. – Київ, 2001.
3. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України [Текст], ЦП/ 0072. – Київ, 2001.
4. Фришман, М. А. Земляное полотно железных дорог [Текст] / М. А. Фришман, И. Н. Хохлов, В. П. Титов. – М.: Транспорт, 1972. – 287 с.
5. Содержание балластной призмы железнодорожного пути [Текст] / под. ред. Е. С. Варызгина. – М.: Транспорт, 1978. – С. 31-35.
6. Карпиловский, В. С., SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
7. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
8. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти [Текст] / Зоценко М. Л. і ін.– Полтава: ПНТУ, 2004. – 568 с.

Надійшла до редколегії 20.12.2011.

Прийнята до друку 16.01.2012.