

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ІЗ ВАРІАНТАМИ ПІДСИЛЕННЯ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

В статті наведені результати числового аналізу напружень і деформацій залізничного насипу із варіантами його підсилення залізобетонними плитами і компенсаційним шаром.

В статье приведены результаты численного анализа напряжений и деформаций железнодорожной насыпи с вариантами ее усиления железобетонными плитами и компенсационным слоем.

In the article the results of numerical analysis of tensions and deformations of railway embankment with the variants of its strengthening by reinforced concrete plates and compensative layer are presented.

Земляне полотно повинно забезпечувати безперервну роботу колії – складної системи з динамічним впливом рухомого складу. Воно повинно бути міцним, стійким та не допускати значних залишкових деформацій [1]. При проектуванні конструкції земляного полотна необхідно враховувати вплив вібродинамічних навантажень від поїздів та зміну властивостей ґрунтів, з яких воно складається, особливо глинистих. Основна площадка земляного полотна є одним із важливих елементів залізничної колії, який визначає стабільність її геометрії. Разом з тим, складні умови роботи ґрунтів основної площадки є основною причиною появи і розвитку дефектів та деформацій, що потребує підвищення витрат на утримання колії.

Стан земляного полотна значною мірою визначає довговічність залізничної колії і об'єми виправочно-рихтувальних робіт з поточного утримання. Оскільки земляне полотно є спорудою, яка експлуатується тривалий час, то всі роботи по його підсиленню повинні проводитися під максимальні очікувані навантаження і швидкості руху поїздів.

Для того, щоб науково обґрунтувати варіан-

ти 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) [2].

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. Таким чином, розроблена просторова модель базується на реальних характеристиках земляного полотна двоколіїної дільниці, які отримані при спорудженні існуючого насипу.

Для досліджень залізничного насипу розроблена розрахункова схема земляного полотна, яка змодельована у комплексі SCAD (рис. 1).

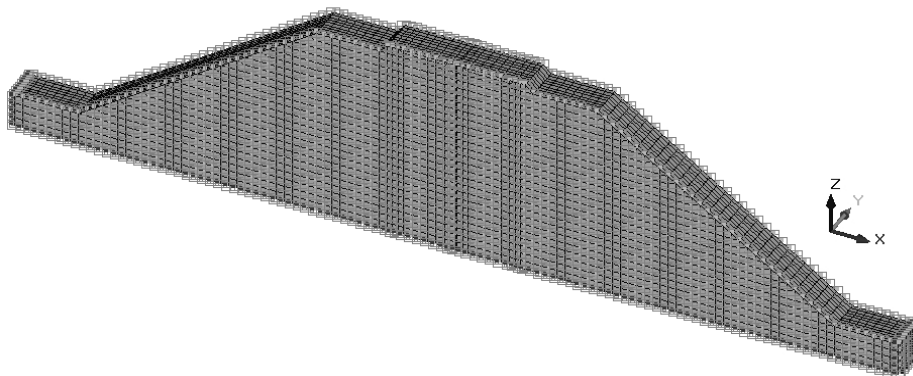


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна високого насипу

Загальна кількість вузлів схеми – 19 940 шт. (біля 55 тисяч ступенів волі), кількість скінченних елементів – 17 073 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 земляного полотна – 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 [2]. У схемі застосовані як призматичні СЕ із трикутною основою (у моделюванні укусу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земляного полотна та основи). Призматичні СЕ із трикутною основою перевірені на умови вироджених та «голчастих» елементів, кути трикутника не менше 45° .

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всіх трьох 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 [3].

Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими ґрунтами земляного полотна:

Жорсткість 1: суглинок щільний, густина

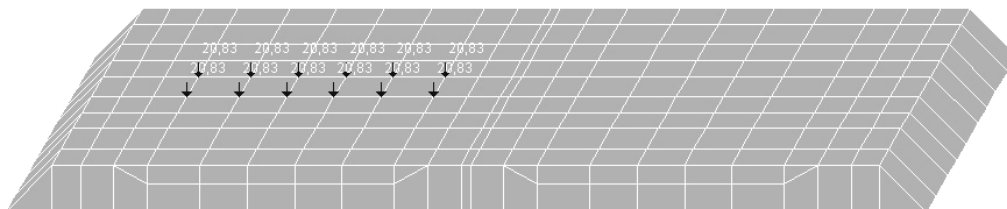


Рис. 3. Розташування навантажень на верхню будову колії (ВБК)

Було прийнято дві схеми завантаження СЕ-моделі: 1-а схема – локомотив без додатку власної ваги земляного полотна; 2-а схема – навантаження схеми лише власною вагою.

2-а схема навантаження надається для контролю переміщень та напружень в моделі, які викликані власною вагою земляного полотна, 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.

Надана розроблена модель приймається як базовий контрольний варіант (Варіант 0), з яким у подальшому порівнюються інші варіанти розрахунків із зміненою конструкцією зем-

$\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E = 30\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$;

Шар 2 – щебінь, густина $\gamma = 2,3 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E = 100\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$;

Шар 3 – залізобетон шпали, густина $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$, приведений модуль пружності $E = 3,51 \cdot 10^7 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,03$.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотивне, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 20 \text{ т}$) із урахуванням коефіцієнту динамічності $\mu = 1,25$ (рис. 2).



Рис. 2. Схема поїздного навантаження

На рис. 3 показано розташування навантажень 1-ї схеми на головній площадці насипу. Навантаження на вісь локомотива розподілене по ширині шпали, на яку воно прикладене, причому воно розподілене по 12-ти вузлах СЕ, які входять до геометричного місця розміщення шпали, і складає 20,83 кН.

ляного 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 [2].

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...5 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїздним навантаженням (Варіант 0).

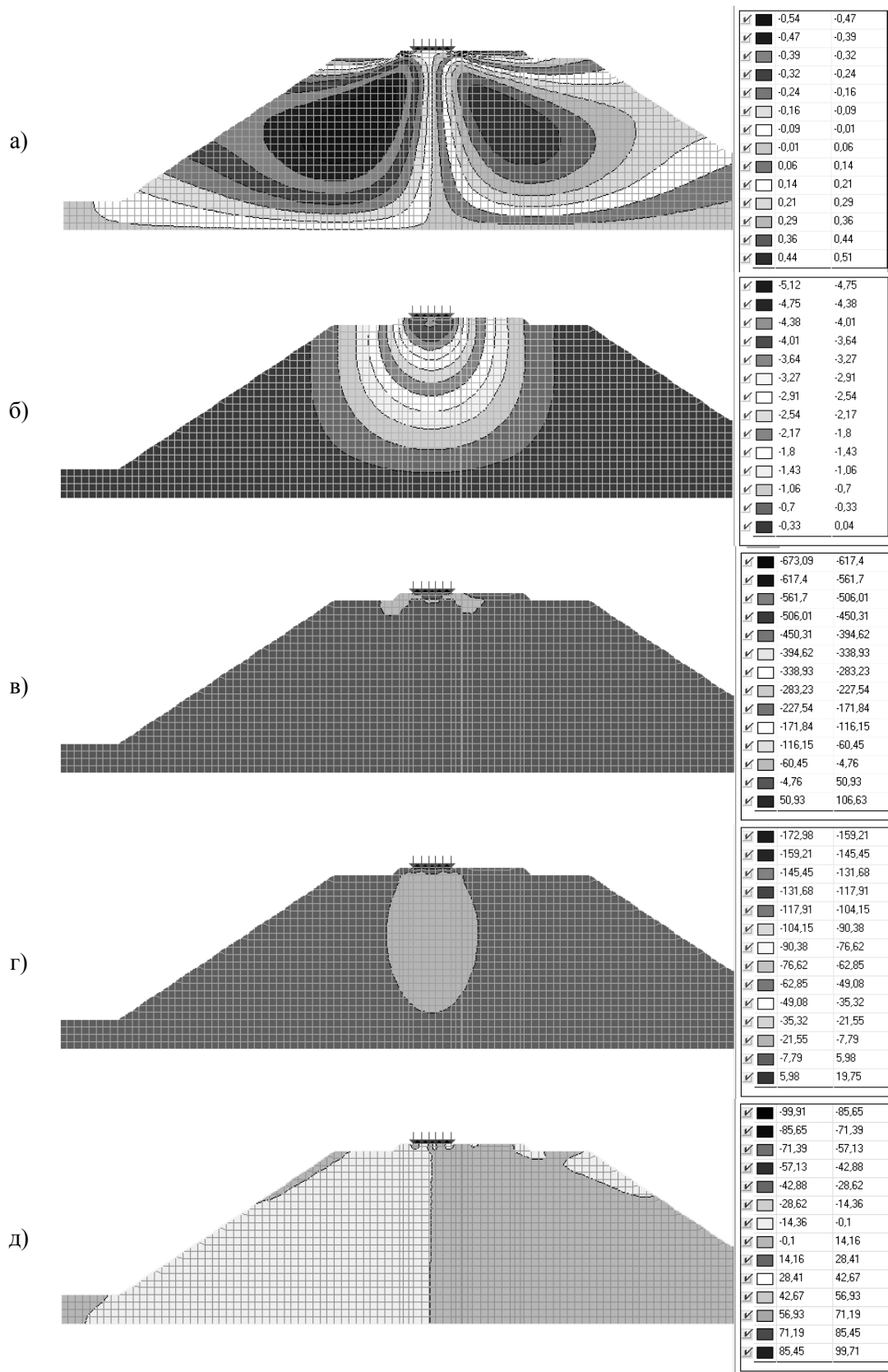


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна); в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

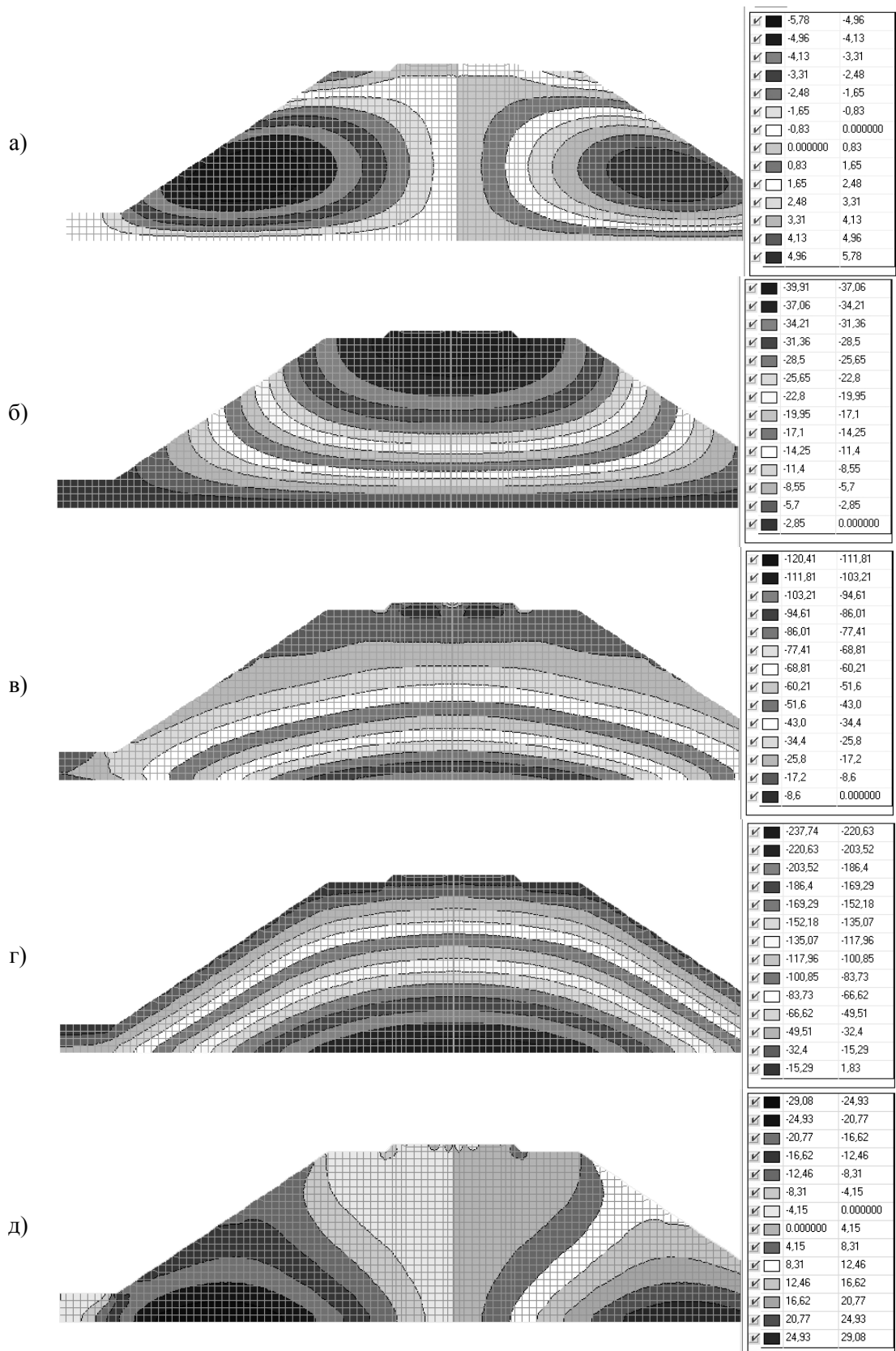


Рис. 5. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0, 2-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

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

на відміну від матеріалу масиву деформаційними характеристиками, наприклад, щебенево-бітумного компенсаційного шару (рис. 6).

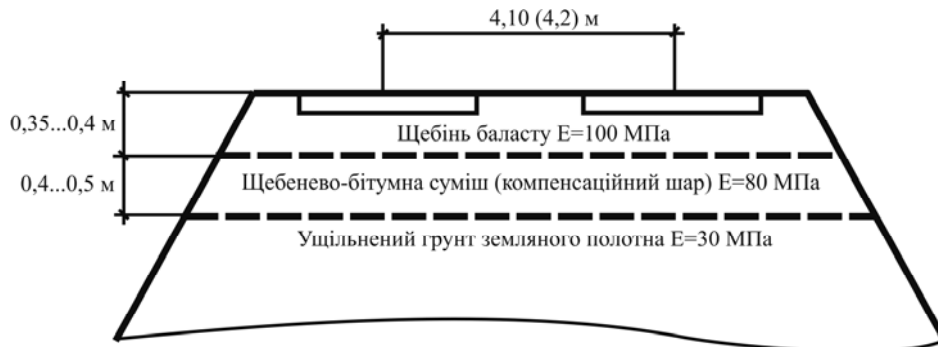


Рис. 6. Схема земляного полотна із шаром зі збільшеними деформаційними характеристиками (компенсаційний шар)

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 – щебенево-бітумна суміш (товщина компенсаційного шару – 0,5 м): густина $\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$, модуль пружності

$E = 80\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$. Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

В якості другого варіанту для дослідження взято варіант залізобетонного кріплення баластної призми, конструкція земляного полотна показана на рис. 7.

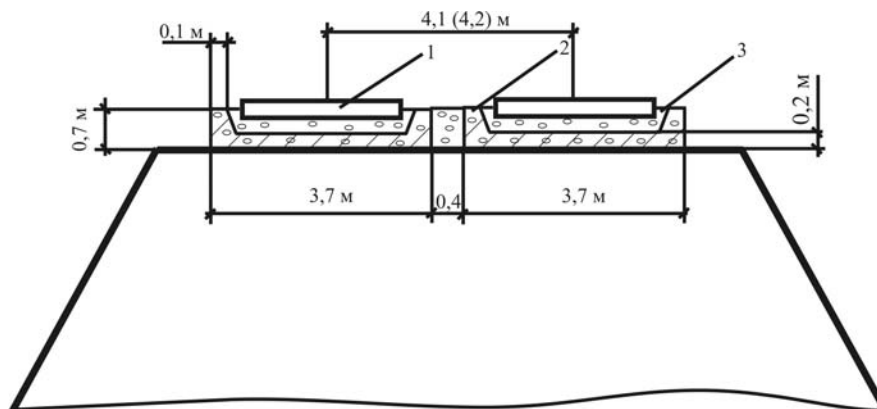


Рис. 7. Схема земляного полотна із залізобетонним кріпленням баластної призми: 1 – залізобетонна шпала; 2 – залізобетонне кріплення; 3 – шар щебеню

Для дослідження Варіанту 2 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до конструкції та деформаційних властивостей

земляного полотна із залізобетонним кріпленням баластної призми (рис. 8).

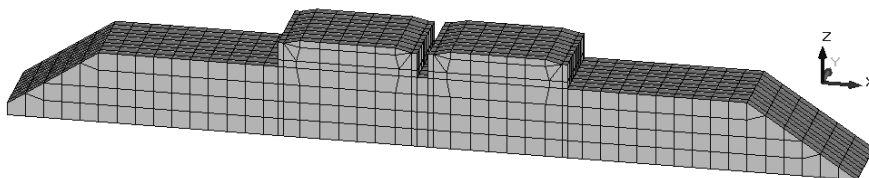


Рис. 8. Відображення конструкції укріплення земляного полотна в SE-моделі (фрагмент)

Всі інші характеристики моделі (деформаційні характеристики, граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

На рис. 9. наведені результати розрахунку моделі Варіанту 1, на рис. 10 – результати розрахунку моделі Варіанту 3.

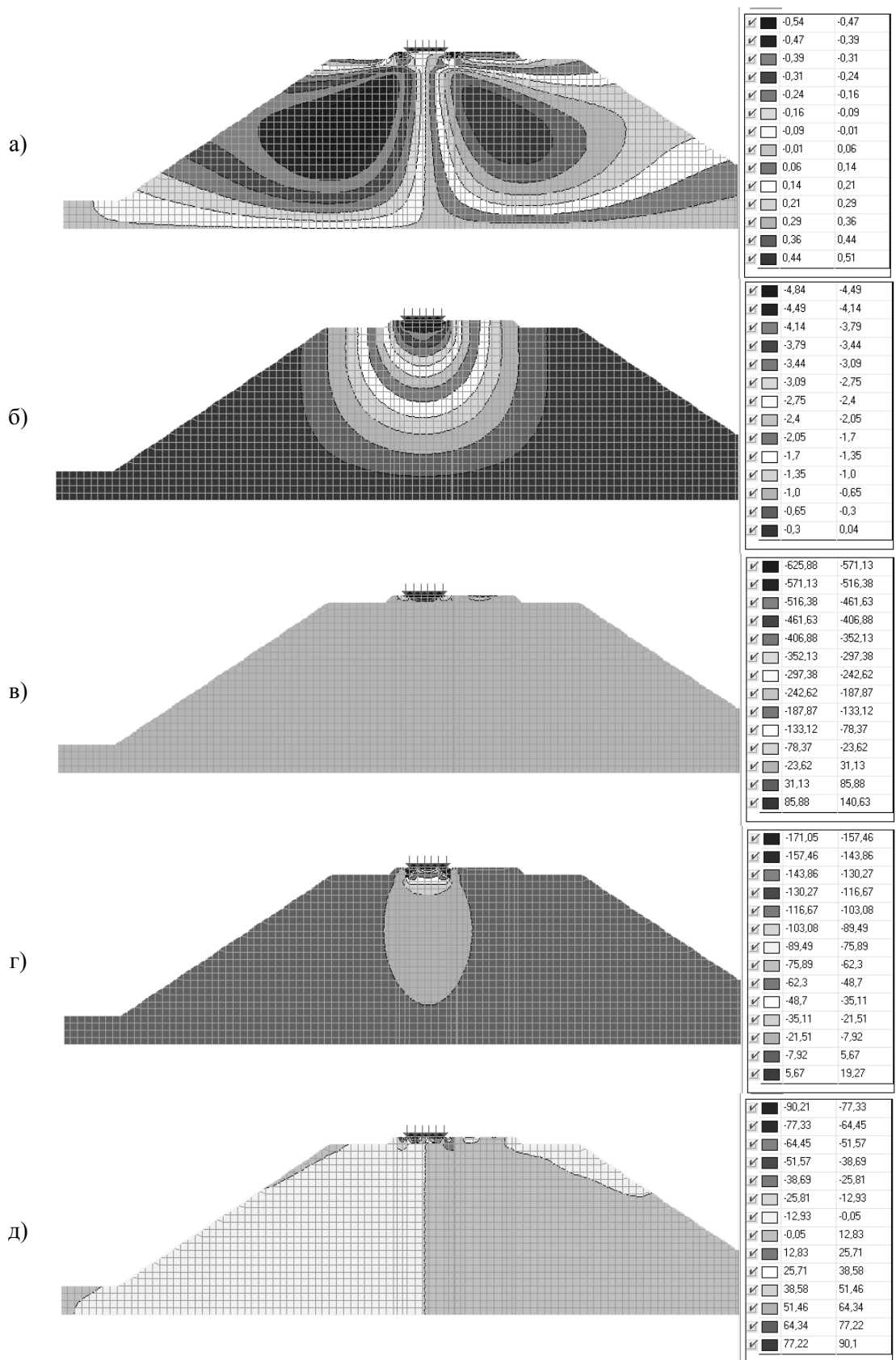


Рис. 9. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 1, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

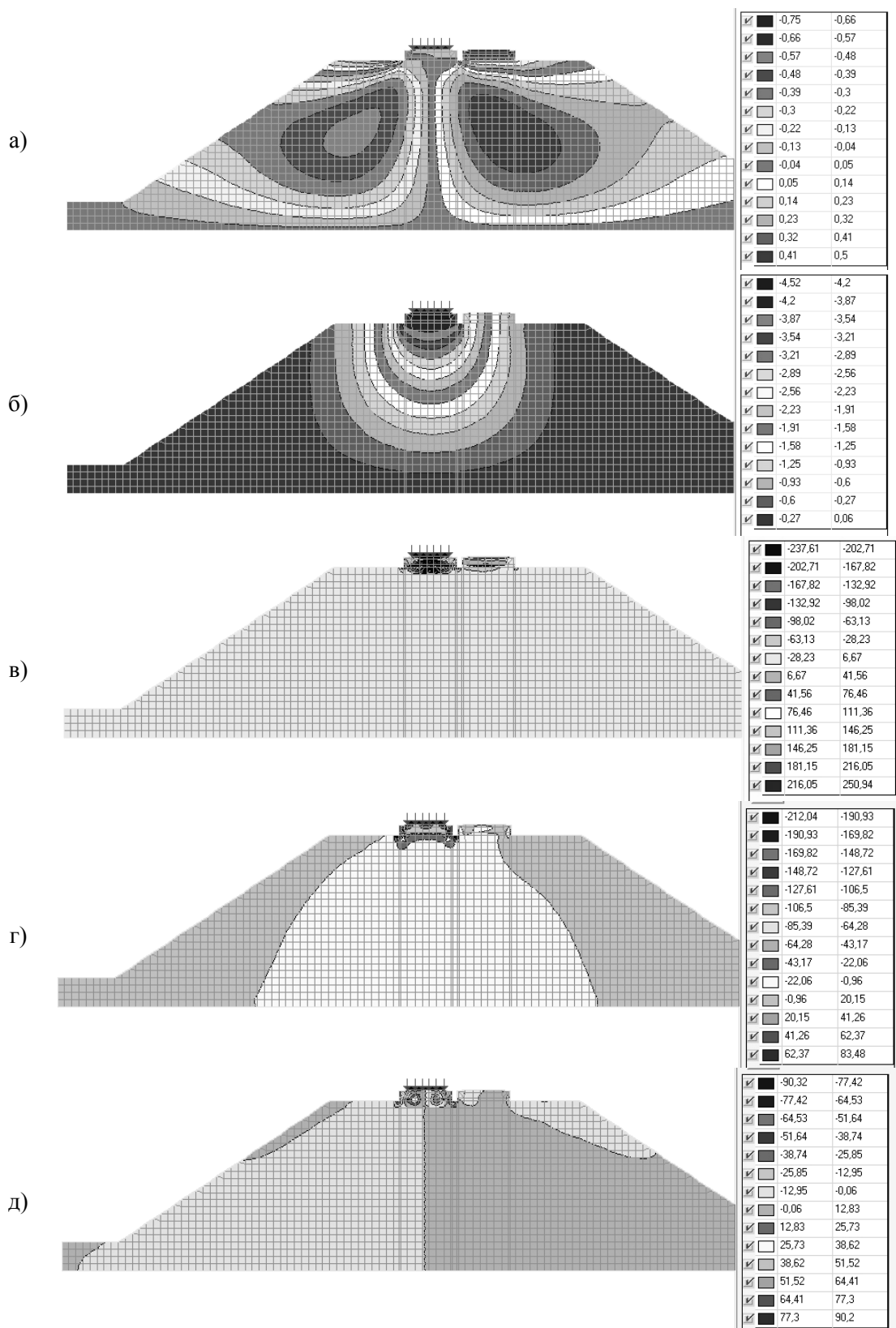


Рис. 10. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 2, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

Таким чином, після проведених розрахунків двох варіантів підсилення конструкції насипу проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану Варіантів 1 і 3 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. 5, а і б) і напружень (рис. 5, в-д) близький до аналітичного, і це підтверджує вірність розробленої СЕ-моделі та її адекватність аналітичним рішенням. Картини переміщень та напружень симетричні, без флуктуацій, що доводить вірність дискретизації розрахункової області на скінченні елементи та високу збіжність скінченно-елементного рішення.

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. 5, в) – ізополе темно-сірого кольору із значенням напруження $-8,6 \text{ кН/м}^2$ ($-0,0086 \text{ МПа}$) та рис. 5, г – викривлення ізополя темно-сірого кольору із напруженням $-15,29 \text{ кН/м}^2$ ($-0,0153 \text{ МПа}$) 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. 5, в, г), а максимальне переміщення верху моделі складає $39,9 \text{ мм}$ (рис. 5, а). Таким чином, аналіз НДС насипу при дії власної ваги свідчить про те, що розроблена модель відповідає вимогам до скінченно-елементної моделі та 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 (компенсаційний шар) змінює картину вертикальних переміщень, дещо їх зменшуючи. Це слідує 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. 9, б), тобто зменшення переміщень незначне (в $1,05$ рази), причому горизонтальні пере-

міщення в двох варіантах не змінилися. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 1 слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 9, б). 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 ньому зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 9, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 9, г, д).

Напружений стан тіла насипу неоднорідний ($0,007 \text{ МПа}$, стиск).

3. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 2 свідчить про те, що застосування залізобетонного кріплення баластної призми значно змінює картину горизонтальних і вертикальних переміщень. Причому горизонтальні переміщення на відміну від Варіанту 0 збільшуються приблизно в $1,3 \dots 1,38$ рази (рис. 10, а), що пояснюється тим, що залізобетонне кріплення, маючи значно більші деформаційні характеристики ніж тіло насипу, виконує роль жорсткого штампу, який витісняє ґрунт під собою в сторони. Але абсолютне значення горизонтальних переміщень не є екстремальним, так як складає $0,75 \text{ мм}$. При цьому максимальне значення вертикальних переміщень у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 2 – $4,52 \text{ мм}$ (рис. 10, б), тобто відмічається зменшення переміщень в $1,1 \dots 1,13$ рази.

Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 3, також слід відмітити їх розподіл, який характерний для розподілу напружень під жорстким штампом. Напружений стан Варіанту 2 на відміну від Варіанту 0 значно покращився: так, стискаючи горизонтальні напруження зменшилися в $2,6 \dots 2,8$ рази з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $237,61 \text{ кН/м}^2$ ($0,237 \text{ МПа}$) у Варіанті 3, але в $2,35 \dots 2,4$ рази збільшилися горизонтальні напруження розтягу з $+106,63 \text{ кН/м}^2$ ($0,106 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $+250,94 \text{ кН/м}^2$ ($0,250 \text{ МПа}$) у Варіанті 3 (рис. 4 та 10, в).

Слід також відмітити, що загальні напруження в тілі насипу у Варіанті 3 стали однорідними ($0,028 \text{ МПа}$, стиск), що пояснюється тим, що основні горизонтальні напруження від дії локомотивного навантаження сприймає залізобетонне кріплення. Також відмічається незначне збільшення вертикальних напружень (рис. 10, г, д) – в $1,23$ рази в середньому, але напружений стан тіла насипу став більш одно-

рідним (0,023 МПа, стиск). Дотичні напруження розповсюджені на межі залізобетонного кріплення та насипу (рис. 10, д). Картина розподілу горизонтальних, вертикальних нормальних та дотичних напружень свідчить про те, що їх більша частина сприймається залізобетонним кріпленням баластної призми.

Після проведеного порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена просторова скінченно-елементна модель насипу дозволила провести ряд числових розрахунків, результати яких після порівняльного аналізу дали змогу свідчити про вплив на загальний напружено-деформований стан 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) свідчить про те, що така зміна незначно покращує загальний НДС насипу, дещо зменшуючи вертикальні переміщення та компоненти напружень, але це зменшення незначне (1,02...1,05 разів).

3. Впровадження залізобетонного кріплення баластної призми значно покращує загальний НДС насипу, так як воно сприймає значну частину поїздного навантаження. На відміну від Варіанту 1 Варіант 2 найбільш позитивно впливає на НДС земляного полотна і може бути рекомендований до подальшої розробки та впровадження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії. ЦП/0084. – К., 2002. – 156 с.
2. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофимчук. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
3. Петренко В. Д. Численное моделирование состояния оснований транспортных сооружений / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тюткин, С. В. Цепак, В. С. Андреев Т. А. Селихова // Залізничний транспорт України, 2005. – № 2 (47). – С. 68-70.

Надійшла до редколегії 01.04.2008.