

УДК 625.12.044.042

В. Д. ПЕТРЕНКО – д.т.н., проф., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, petrenko.diit@gmail.com

О. Л. ТЮТЬКІН – к.т.н., доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, tutkin@mail.ru

В. П. КУПРІЙ – к.т.н., доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, kurgiy@i.ua

## АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ УМОВ ЙОГО БЕЗПЕКИ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ШВИДКОСТІ РУХУ

### Постановка проблеми

Стратегічний курс Українських залізничних доріг направлений на розвиток швидкісного руху, підвищення комфортності перевезень пасажирів і надійності транспортування вантажів. Деформації земляного полотна і верхньої будови колії в значній мірі перешкоджають швидкісному руху поїздів та збільшують експлуатаційні витрати. На дільницях зі швидкісним рухом поїздів Укрзалізницею встановлені додаткові вимоги по стану та утриманню колії. Основна особливість в утриманні колії, на якій реалізуються такі швидкості, полягає в підвищених вимогах до забезпечення плавності рейкових ниток. Одним із засобів прогнозування є комплексний аналіз стійкості на основі математичного та імітаційного моделювання земляного полотна, які є додатковими до методу відсіків, що поширений у проектних організаціях. В основу проектних рішень на різних дільницях дороги, використовуються діючі нормативні документи та будівельні норми, які є дуже узагальнюючими, не завжди підтверджуються необхідними розрахунками, особливо це стосується урахування у розрахунках динамічного впливу.

### Мета

Земляне полотно – це фундамент залізничної колії, від стійкості, міцності та деформаційної незмінності якого залежить безпека руху поїздів із встановленими

швидкостями. Головною умовою стійкості земляного полотна є необхідність повного відведення води від насипів і виїмок, а також недопущення появи залишкових деформацій при сприйманні перемінних навантажень від рухомого складу і сезонних діянь кліматичних факторів. Мета роботи полягає в аналізі стійкості земляного полотна залізниці при швидкісному русі.

### Результати

Аналіз стійкості земляного полотна буде проводитися на основі методу МСЕ. Доцільність застосування цього методу пояснюється тим, що застосування аналітичних методів до земляного полотна такого складного поперечного профілю майже неможливе [1]. Без сумніву, розроблені аналітичні положення розрахунку насипів та укосів такими авторитетними вченими, як Заворицький [2], Лобанов [3], Шахунянц [4] та іншими [5, 6], враховуються при створенні скінченно-елементних моделей і виступають в ролі перевірочних положень. Але варіанти земляного полотна, яке розглядаються до реконструкції та в її процесі, не дозволяють застосовувати аналітичні методи по причині складності його конфігурації. Всі ці проблеми просто вирішуються із застосуванням методу скінченних елементів, який знімає усі складнощі щодо форми та значних змін жорсткості [7].

Модель для розрахунку прийнята просторовою для більшого врахування реальних

характеристик об'єкту, що досліджується. Всі геометричні та деформаційні характеристики земляного полотна узяті із нормативної документації. Метод скінченних елементів дозволяє розглядати напруження та переміщення у неоднорідних середовищах. Тому розрахункова схема не повинна обмежуватися заміною споруди чи основи контактними епіюрами. Зміну густини скінченно-елементної сітки необхідно застосовувати, якщо апіорі не вдається визначити область земляного полотна, де слід деталізувати дослідження напружень і деформацій. Розрахункова схема земляного полотна, реалізована у комплексі SCAD (рис. 1).

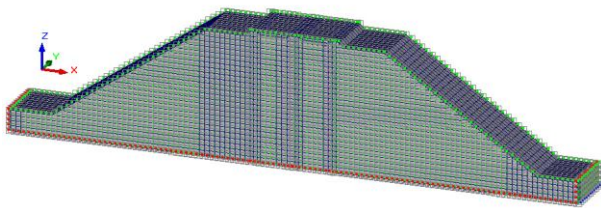


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна високого насипу

Така конструкція обґрунтована експериментальними дослідженнями [8-10] та запатентована [11]. На рисунку 2 вона наведена для одноколіїної дільниці, але для двоколіїної конструкція підсилення принципово не змінюється.

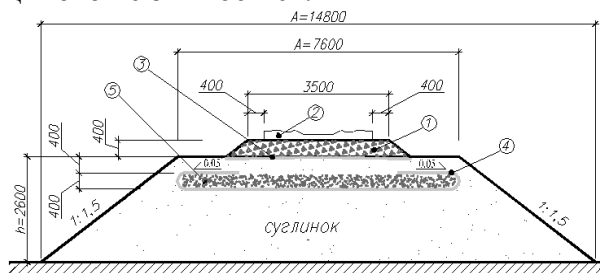


Рис. 2. Комбінована конструкція підсилення земляного полотна:

1) баластний шар; 2) шпала; 3) геотекстиль під баластним шаром; 4) підсилюючий шар геотекстилю із відгинами; 5) щебеневу-грунтова суміш

Загальна кількість вузлів схеми – 23 928 шт. (біля 70 тисяч ступенів волі), кількість скінченних елементів – 20 867 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 – 5,5 м, висота – 12,5 м (з яких висота земляного полотна – 12 м). Проведене моделювання всієї висоти насипу, але навантаження від рухомого складу є локальним і зменшує свій вплив вже на глибині 4,5...5 м, враховуючи значні деформаційні властивості земляного полотна.

Розміри СЕ коливаються у межах  $0,30 \times 0,5 \times 0,5$ ,  $0,35 \times 0,5 \times 0,5$  до  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  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 укосу), 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  $60^\circ$ .

На схему накладені граничні умови: по низу моделі заборона переміщення по всім трьом осям X, Y та Z, по боках основи – заборона по осях X та Y, по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умови пласкої деформації). Верх та відкоси моделі від граничних умов вільні.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотив (перша пара). Тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ( $P=20$  т) із урахуванням коефіцієнту динамічності  $\mu=1,5$ , тобто  $P=30$  т. Було прийнято три схеми завантаження СЕ-моделі.

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

На рис. 3–8 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїзним навантаженням.

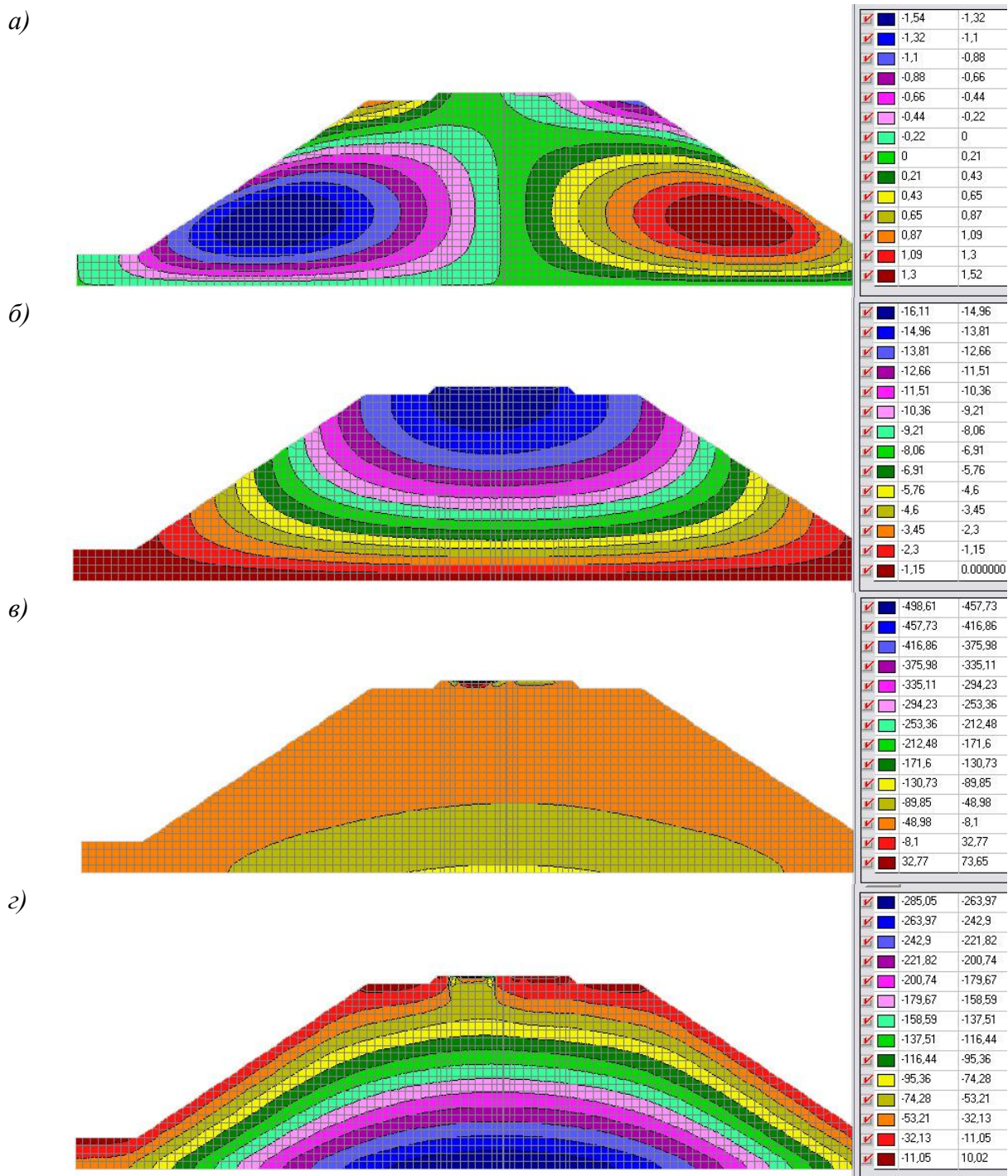


Рис. 3. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку насипу  
із однорідного матеріалу, 1-а схема завантаження:  
а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);  
в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження  
по осі Z (вертикальна)



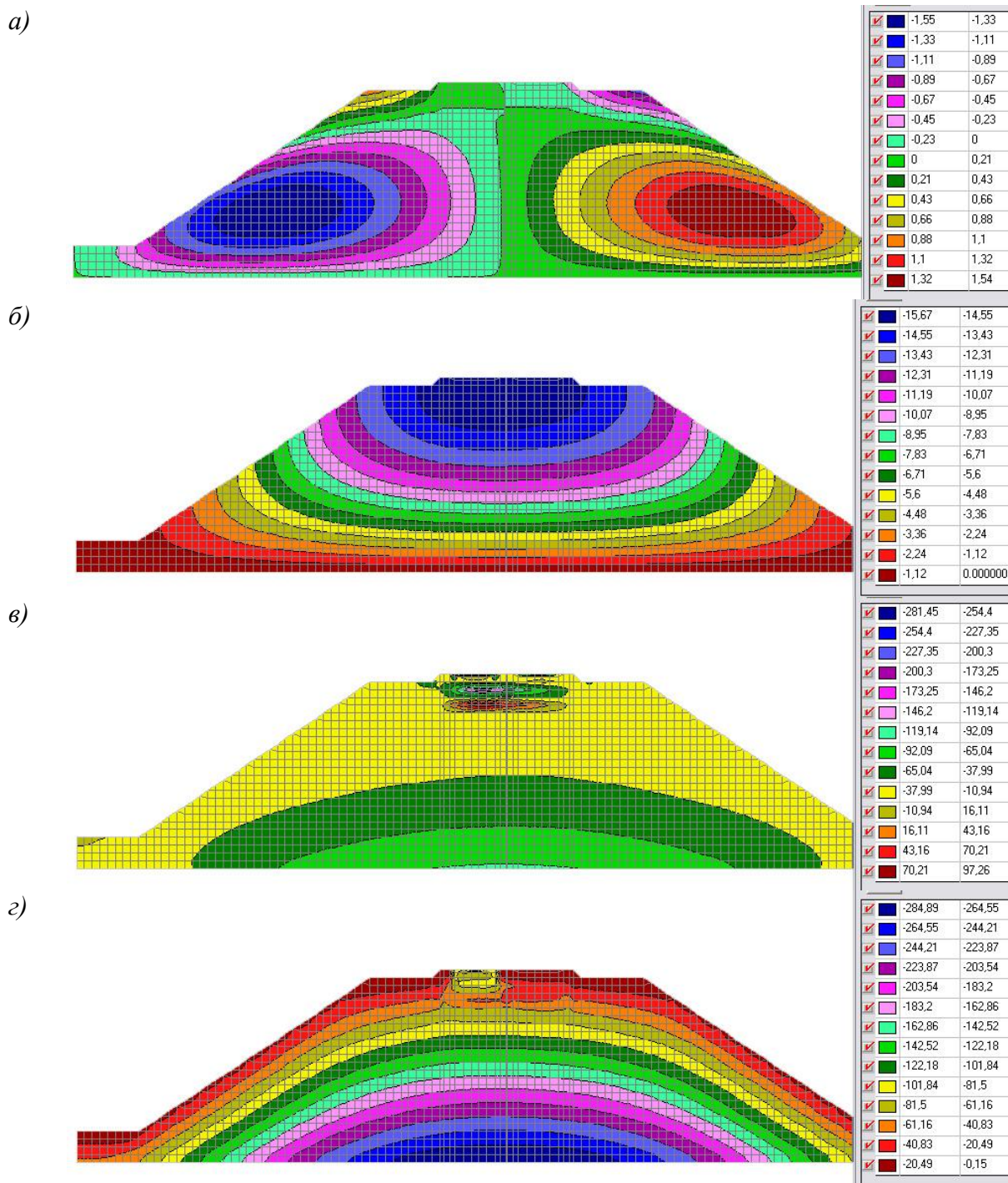
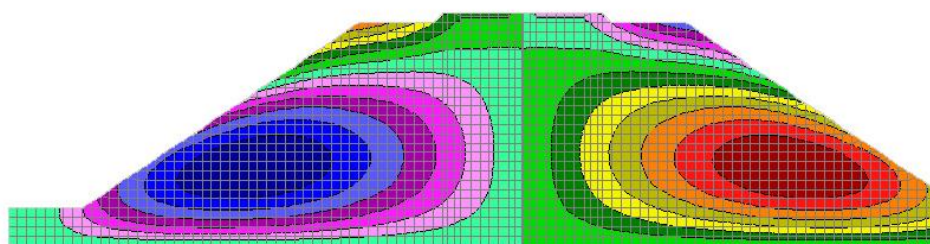
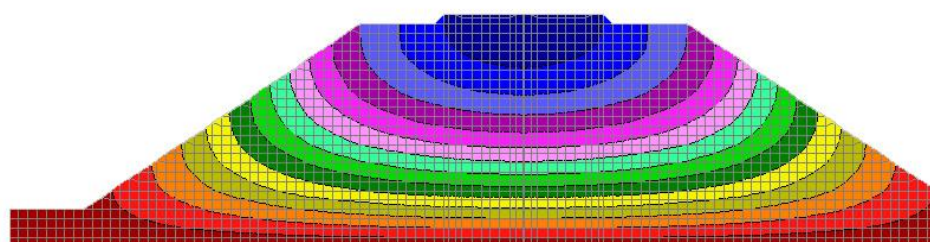


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку насипу із комбінованим підсиленням геосинтетиками, 1-а схема завантаження:  
а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);  
в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна)

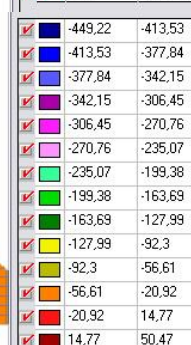
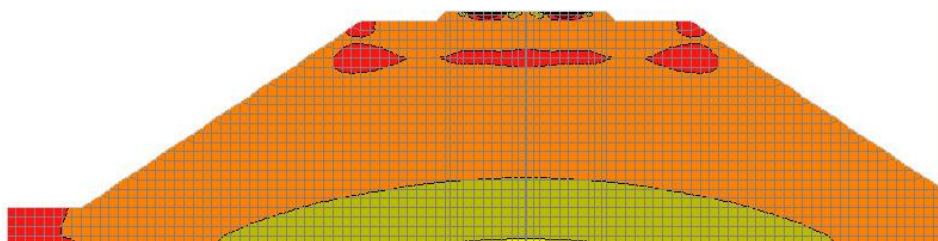
а)



б)



в)



г)

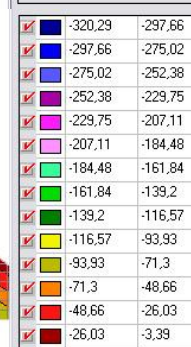
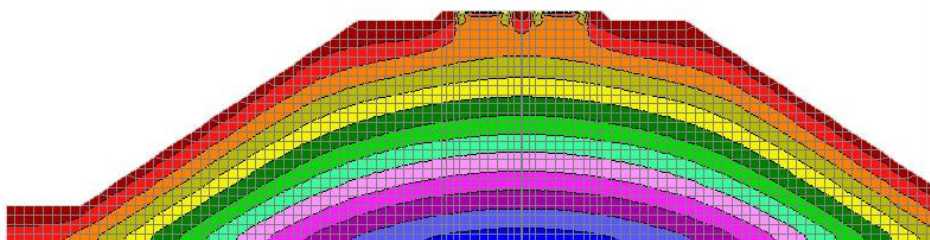


Рис. 5. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку насипу із однорідного матеріалу, 2-а схема завантаження:  
а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);  
в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна)



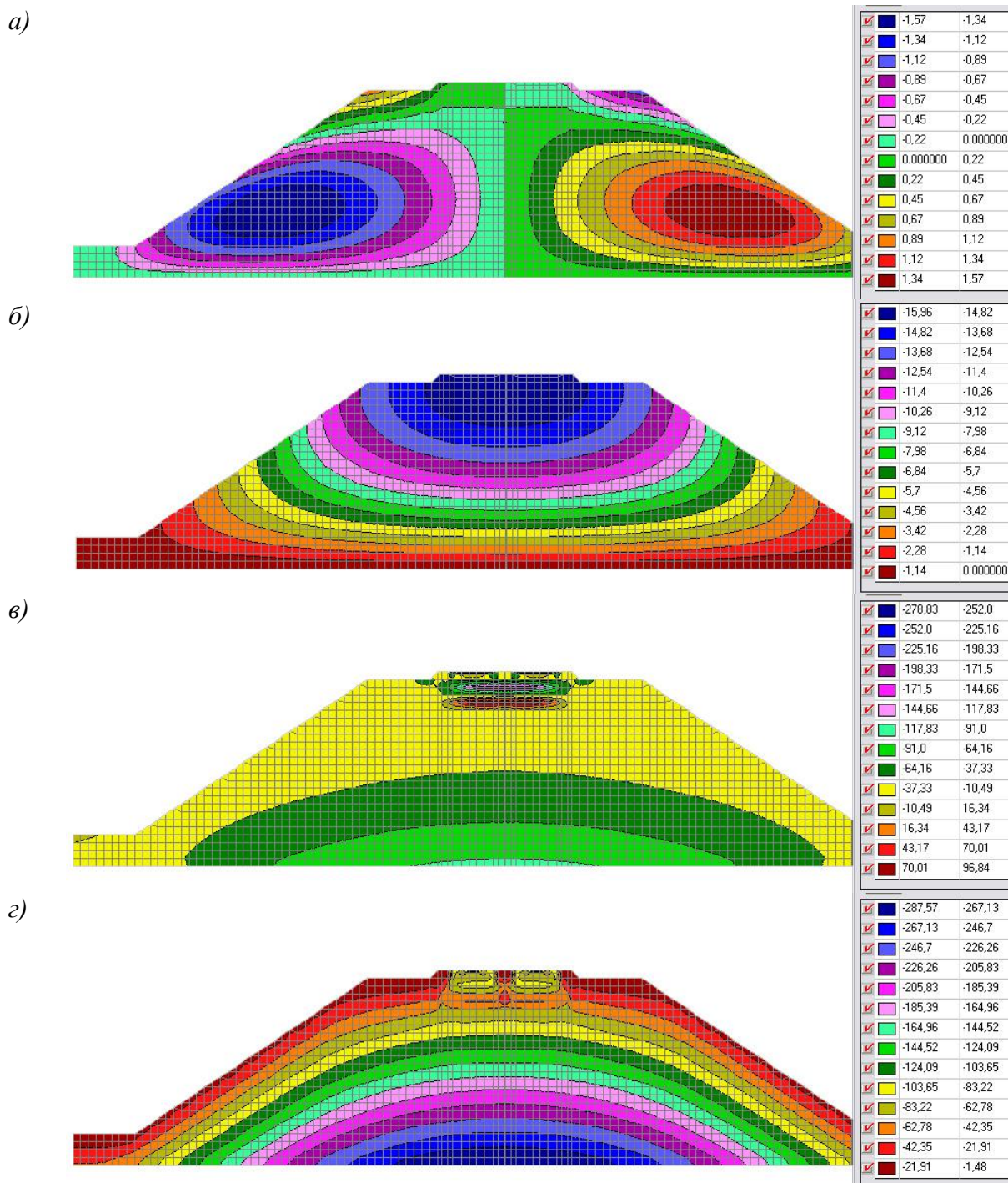
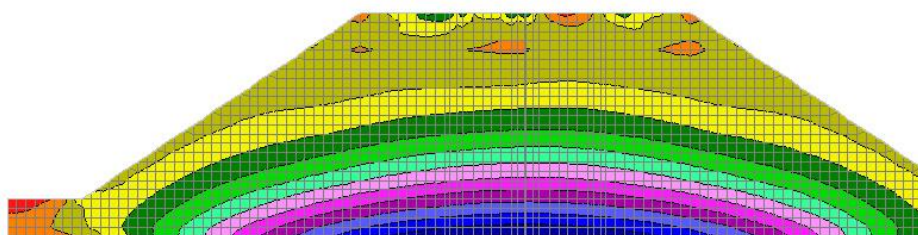


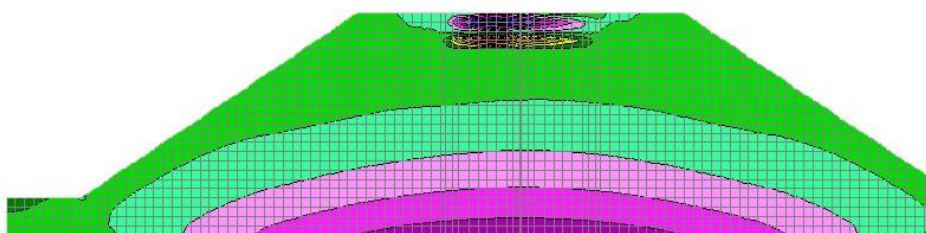
Рис. 6. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку насипу із комбінованим підсиленням геосинтетиками, 2-а схема завантаження:  
а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);  
в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна)

а)



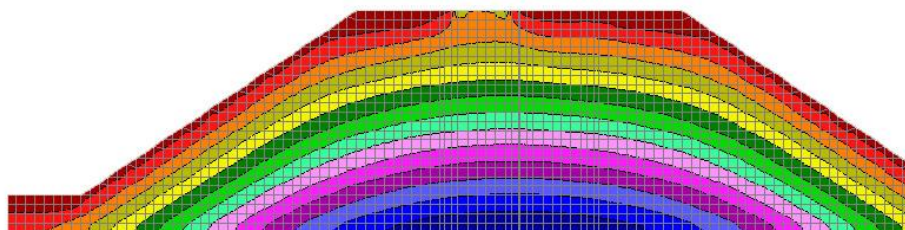
✓	-95,02	-88,1
✓	-88,1	-81,19
✓	-81,19	-74,27
✓	-74,27	-67,36
✓	-67,36	-60,45
✓	-60,45	-53,53
✓	-53,53	-46,62
✓	-46,62	-39,7
✓	-39,7	-32,79
✓	-32,79	-25,88
✓	-25,88	-18,96
✓	-18,96	-12,05
✓	-12,05	-5,13
✓	-5,13	1,78

б)



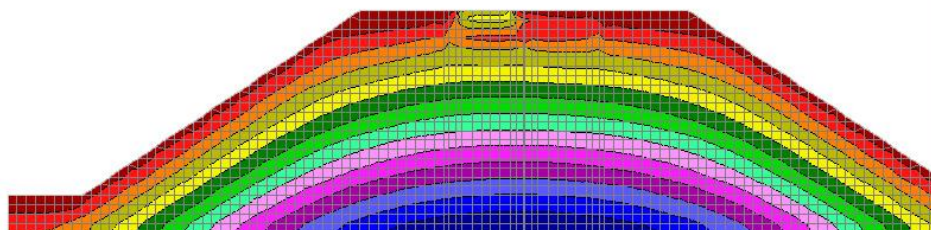
✓	-157,84	-139,62
✓	-139,62	-121,4
✓	-121,4	-103,17
✓	-103,17	-84,95
✓	-84,95	-66,73
✓	-66,73	-48,51
✓	-48,51	-30,29
✓	-30,29	-12,07
✓	-12,07	6,15
✓	6,15	24,38
✓	24,38	42,6
✓	42,6	60,82
✓	60,82	79,04
✓	79,04	97,26

в)



✓	-285,05	-264,93
✓	-264,93	-244,81
✓	-244,81	-224,7
✓	-224,7	-204,58
✓	-204,58	-184,46
✓	-184,46	-164,34
✓	-164,34	-144,23
✓	-144,23	-124,11
✓	-124,11	-103,99
✓	-103,99	-83,87
✓	-83,87	-63,75
✓	-63,75	-43,64
✓	-43,64	-23,52
✓	-23,52	-3,4

г)



✓	-284,89	-264,78
✓	-264,78	-244,68
✓	-244,68	-224,57
✓	-224,57	-204,46
✓	-204,46	-184,35
✓	-184,35	-164,25
✓	-164,25	-144,14
✓	-144,14	-124,03
✓	-124,03	-103,93
✓	-103,93	-83,82
✓	-83,82	-63,71
✓	-63,71	-43,6
✓	-43,6	-23,5
✓	-23,5	-3,39

Рис. 7. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень, 1-а схема завантаження:  
а) нормальні напруження по осі X (без підсилення геосинтетиками); б) нормальні напруження по осі X (з комбінованим підсиленням геосинтетиками); в) нормальні напруження по осі Z (без підсилення геосинтетиками); г) нормальні напруження по осі Z (з комбінованим підсиленням геосинтетиками)



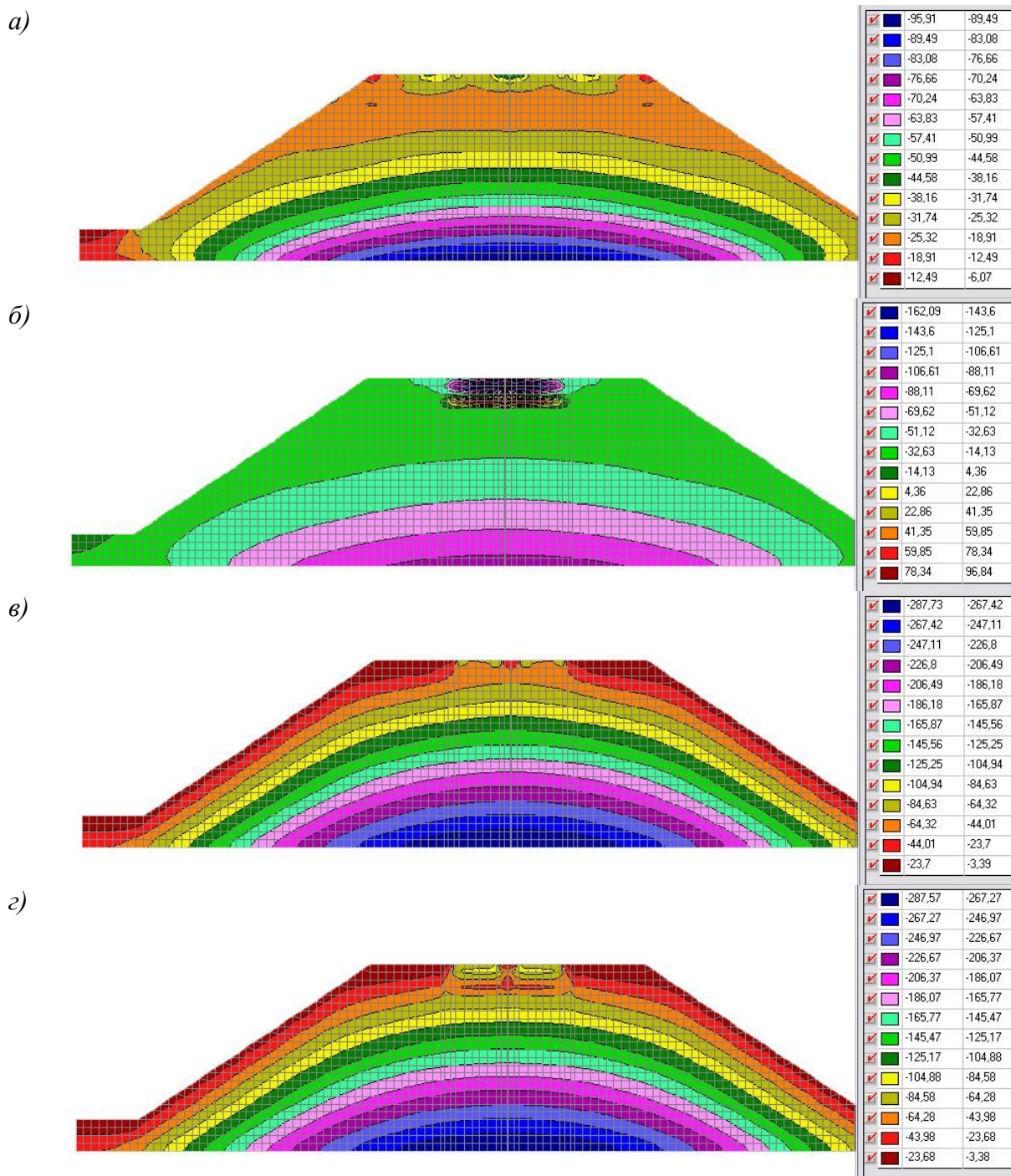


Рис. 8. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень, 2-а схема завантаження:  
а) нормальні напруження по осі X (без підсилення геосинтетиками); б) нормальні напруження по осі X (з комбінованим підсиленням геосинтетиками); в) нормальні напруження по осі Z (без підсилення геосинтетиками); г) нормальні напруження по осі Z (з комбінованим підсиленням геосинтетиками)



Найбільш інформативні результати аналізу стійкості отримані при порівнянні параметрів НДС в насипу з однорідного матеріалу з насипом з комбінованим підсиленням геосинтетиками та щебеневогрунтовою сумішшю. Аналізуючи ці результати можна зробити наступні висновки щодо стійкості земляного полотна високого насипу.

Загальна картина розподілу переміщень та напружень в однорідному насипу співпадає з якісною аналітичною картиною, що є тим фактом, який доводить адекватність застосованої моделі реальному розподілу НДС. Однак у досліджуваному випадку окрім дії власної ваги масиву змодельована дія поїздного навантаження, що можна побачити в розподілі напружень у верхній будові колії (ВБК) (рис. 3, *з–д*). Напруження від поїзда також близькі до аналітичного рішення впливу розподіленого навантаження на пружний простір.

Порівнюючи переміщення у випадку насипу з однорідного матеріалу (далі – Випадок 1) та у випадку насипу з комбінованим підсиленням геосинтетиками (далі – Випадок 2) можна засвідчити, що армування земляного полотна геосинтетичними елементами надало позитивних властивостей всій системі. Так, дещо знизилися переміщення (приблизно на 0,45...0,5 мм) та нормальні напруження по осі Z, а нормальні напруження по осі X знизилися значно (у 1,75...1,77 разів). Слід відмітити, що постановка геосинтетики у зону активного розподілу поїздного навантаження змінила картину напружень кількісно і якісно (рис. 3 та 4, *в–д*). Так у випадку нормальних напружень по осі X їх розподіл змінився таким чином, що зона збільшених напружень змістилася від ВБК до межі обойми з геосинтетики (рис. 4, *в*), причому значення максимальних напружень у 0,498 МПа зменшилося до 0,282 МПа (у 1,78 разів). Хоча візуально картина розподілу нормальних напружень по осі X значно ускладнилася (з'явилися дві зони на межах обойми з геосинтетики), але кількісно їх значення значно нижче межі руйнування ґрунту.

Порівняльний аналіз випадку 1 та 2 при другій схемі завантаження надав змогу оцінити зміну рівня НДС при проході поїзду на двох коліях. Слід відмітити, що в обох випадках вертикальні переміщення змінилися незначно (на 0,02 мм), горизонтальні – на 0,3 мм відповідно. Напружений стан земляного полотна при другій схемі навантаження став симетричним та однорідним на відміну від першої схеми, що було очікувано. Також можна свідчити, що при цій схемі в обох випадках на межі між шарами з'явилася зона деякої неоднорідності нормальних напружень по осі X (від -0,02 МПа в земляному полотні до +0,014 МПа на межі шарів, рис. 5–6, *в*), що може бути причиною утворення зони зсуву. Однак значення, отримані при математичному моделюванні не дають змоги свідчити про наявність такої зони, та слід відмітити, що модель створена на основі ідеальних деформаційних характеристик елементів системи і тому не може відповідати дійсному земляному полотну повністю.

Оскільки баластна призма отримує значну частину розподілу напруженого стану, проаналізовано земляне полотно без цього елементу, що можливе у комплексу SCAD. Порівняння нормальних напружень по осі X у земляному полотні (рис. 7–8, *а–б*) свідчить про те, що для 1-ого завантаження їх рівень збільшився у зоні обойми з геосинтетики майже у 10 разів. У земляному полотні рівень нормальних напружень по осі X зменшився на 0,01 МПа, а нормальних напружень по осі Z – на 0,1 МПа у випадку комбінованого підсилення геосинтетиками.

### Висновки

Армування земляного полотна надало перерозподілу напружень іншої локалізації, а саме в районі обойми з геосинтетики. Оскільки ці елементи мають значно більшу межу міцності, то збільшення напружень не впливає на систему негативно, хоча, як вже відмічалось, слід очікувати можливих змін у НДС земляного полотна і вважати можливість зсуву реальною. Тому окрім мате-

матичного моделювання, результати якого слід вважати перевірочними, треба проводити геотехнічний моніторинг стану земляного полотна, оскільки маркшейдерських замірів може бути недостатньо у тому випадку, коли формування зони зсуву можливе на глибині 2,5...3 м.

У подальшому можлива оптимізація розташування геосинтетики по висоті, оскільки надане положення може бути не самим оптимальним, хоча отримані результати свідчать про позитивний вплив цих елементів.

### Бібліографічний список

1. Асимьбеков, Д. А. Определение напряжений в насыпи от действия собственного веса методом конечных элементов [Текст] / Д. А. Асимьбеков, С. Ш. Шукуров. – Алма-Ата: Алмаатинский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1980. – 6 с.
2. Заворицкий, В. Й. Експериментальні дослідження напруженого стану земляного полотна [Текст] / В. Й. Заворицкий. – Київ: Будівельник, 1994. – С. 3-25.
3. Лобанов, И. З. О методике расчета напряжений в грунтах при проектировании дорожных земляных сооружений [Текст] / И. З. Лобанов, В. И. Лобанов. – Сб. «Земляное полотно и геотехника на железнодорожном транспорте», Днепропетровск, 1983. – С. 33-37.
4. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] / Г. М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
5. Методические указания по применению геосинтетических материалов в дорожном строительстве [Текст]. Москва: ТИМР, 2001. – 40 с.
6. Уманов, М. І. Збірник типових технологічних процесів капітального та середнього ремонтів залізничної колії (ЦП-2-1198) [Текст] / М. І. Уманов, В. П. Гнатенко, К. В. Мойсеєнко. – Д: ДІТ, Арт-Прес, 2000. – 108 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. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз стану двох варіантів підсилення конструкції земляного полотна [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісник ДНУЗТ, 2009. – Випуск 29. – С. 107-111.
9. Петренко, В. Д. Результати аналізу параметрів експериментальних досліджень армування геотекстилем земляного полотна [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісник ДНУЗТ, 2010. – Випуск 34. – С. 131-135.
10. Петренко, В. Д. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований усиления земляного полотна малодеформируемым слоем [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вестник ДНУЗТ, 2010. – Вып. 35. – С. 139-144.
11. Петренко, В. Д. Спосіб укріплення земляного полотна [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, І. В. Петрівський // Патент на корисну модель № 75553 від 10.12.2012. – Бюл. № 23 від 10.12.2012.

**Ключові слова:** стійкість, безпека, земляне полотно, підсилення.

**Ключевые слова:** устойчивость, безопасность, земляное полотно, усиление.

**Keywords:** stability, safety, railway bed, reinforce.

### Рецензенти:

д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,  
д.т.н., проф. М. М. Біляєв.

Надійшла до редколегії 03.03.2015.

Прийнята до друку 17.03.2015.