

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Мости та тунелі»

До захисту:

Завідувач кафедри МТ

_____ О. Л. Тютюкін

«_____» _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ОС «магістр»

Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

ОПП «Мости і транспортні тунелі»

Тема: «Обґрунтування технології підсилення земляного полотна
на основі бурозмішувальної технології»

Theme: “Substantiation of the strengthening technology of the subgrade
by the drilling-mixing technology”

Керівник магістерської роботи	<u>Д.т.н., проф.</u> (посада)	_____ (підпис)	<u>В. Д. Петренко</u> (ПІБ)
Консультант розділу з БЖД	<u>К.т.н., доц.</u> (посада)	_____ (підпис)	<u>Ю. Л. Заяць</u> (ПІБ)
Нормоконтролер	<u>Д.т.н., доц.</u> (посада)	_____ (підпис)	<u>О. Л. Тютюкін</u> (ПІБ)
Виконавець, студентка групи МТ1926		_____ (підпис)	<u>Ю. В. Резуник</u> (ПІБ)
Student		_____ (підпис)	<u>Yuliia Rezunyk</u>

2020 р.

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реферат

Дипломна робота магістра представлена на ____ сторінках та містить ____ рисунків, ____ таблиць, ____ літературні джерела.

Об'єкт дослідження: підсилене залізничне земляне полотно.

Предмет дослідження: параметри підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології.

Мета роботи полягає в обґрунтування технології підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології.

В дипломній роботі магістра вирішені наступні **задачі:**

1. Проведено аналіз стану питання проєктування підсиленого земляного полотна залізниці.

2. Застосовано методіку математичного моделювання земляного полотна за допомогою методу скінченних елементів та розроблено алгоритм розрахунку підсиленого земляного полотна з допомогою комплексу SCAD.

3. Виконано математичне моделювання варіантів підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології із варіацією геометричних параметрів елементів підсилення.

4. Проведено обґрунтування технології підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології.

Галузь застосування: залізниця.

Ключові слова: земляне полотно, підсилення, бурозмішувальна технологія, математичне моделювання, напружено-деформований стан

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Вплив варіації геометричних параметрів елементів підсилення

Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Загальні висновки

Бібліографічний список

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

В теперішній час однією з найактуальніших проблем на залізницях України є проблема зниження витрат на реконструкцію і ремонт земляного полотна при дотриманні параметрів його міцності, стійкості, надійності, і довговічності. Вимоги до міцності і стійкості земляного полотна постійно підвищуються і диктують необхідність розробки і широкого упровадження сучасних способів підсилення. Існує серйозна проблема, що виникла протягом довгого терміну існування українських залізниць, а саме накопичення деформацій, дефектів та занурення баластних матеріалів в ґрунт земляного полотна. Це призводить до викривлення колії та утруднення експлуатаційної роботи залізниці.

Відомі варіанти підсилення геосинтетичними матеріалами є одним з найефективніших способів підсилення. Але науково обґрунтовані варіанти такого підсилення, що пропонувалися протягом двадцяти років Галузевою науково-дослідною лабораторією механіки ґрунтів ДНУЗТу, так і не були повною мірою втілені АТ «Укрзалізниця». Це, без сумнівів, пояснюється об'єктивним станом галузі, оскільки рішення, що пропонуються, потребують відпрацьованої технології, яка і досі не прийнята до виконання.

В останній час достатньо широко використовується такий метод підвищення несучої здатності основного майданчика, як хімічне закріплення ґрунтів. Найпоширенішими з них є цементація, смолізація, силікатування, обробка ґрунтів кремнійорганічними з'єднаннями, вапнування, технологія Jet Grouting. Перераховані способи застосовуються, головним чином, для підсилення ґрунтів основного майданчика, тобто фактично виконання такого роду заходів веде до створення підбаластного укріпленого шару ґрунту, здатного сприймати підвищені вібродинамічні навантаження.

Але і ці технології, що є наукоємними та такими, що потребують значної культури їх втілення, є на даний час складними. Також проведення наданих заходів неможливе без обмеження руху, що в сукупності з великими обсягами

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

011.196103.МР.2020.000

земляних робіт спричиняє значні економічні втрати. В зв'язку з цим значна увага надається методам відновлення земляного полотна, реалізація яких можлива без перерв в русі потягів, зокрема підсилення за допомогою елементів, що створені на основі бурозмішувальної технології.

Таким чином, із урахуванням відміченого, програми ресурсозбереження, які прийняті на залізницях України, і вимоги з міцності та стійкості земляного полотна, що постійно підвищуються, потребують розробки та наукового обґрунтування технології підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології. Основними початковими параметрами, що потребують дослідження, є розміщення елементів підсилення, створених на основі бурозмішувальної технології, в тілі насипу та геометричні параметри цих елементів.

Таким чином, мета магістерської роботи полягає в обґрунтуванні технології підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології, що є актуальною задачею підвищення параметрів міцності, стійкості, надійності і довговічності земляного полотна. Для досягнення мети магістерської роботи проведено аналіз стану питання проектування підсиленого земляного полотна залізниці та виконано математичне моделювання варіантів підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології із варіацією геометричних параметрів елементів підсилення.

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз стану питання проєктування підсиленого земляного полотна залізниці

1.1 Аналіз хвороб земляного полотна, що потребує підсилення

Земляне полотно є найважливішим елементом колії, який виконаний з ґрунту і має своєю основою також ґрунт [2, 6, 9, 18, 32]. В наданій магістерській роботі розглядається лише варіант земляного полотна у вигляді насипу із властивими саме йому «хворобами» [4, 17, 28], які значно впливають на його експлуатаційну здатність. Воно повинне бути міцним, стійким і довговічним, що потребує мінімуму витрат на його обладнання, утримування і ремонт та забезпечує можливість широкої механізації робіт.

До земляного полотна, що потребує підсилення, прийнято відносити таке, що має дефекти основного майданчика земляного полотна [4, 17, 28], сформовані в результаті вдавлювання в ґрунту матеріалу баластної призми. Це відбувається унаслідок неякісного влаштування або відсутності розділових шарів верхньої будови шляху (подушки баластної призми, геосинтетичного розділового шару). При цьому в основному майданчику земляного полотна утворюються локальні поглиблення, що акумулюють воду. При водонасиченні ґрунтів відбувається зниження їх механічних характеристик, що сприяє інтенсивному розвитку поглиблення. По ступеню розвитку і місцю локалізації поглиблень розрізняють баластні ложа, корита, мішки і гнізда.

Проведені раніше дослідження показують, що розвинені баластні поглиблення стають однією з основних причин загальної втрати міцності та стійкості земляного полотна [17, 28]. В цьому випадку розвитку деформацій сприяють значне зволоження ґрунту в області баластного поглиблення і низькі міцнісні характеристики матеріалу, що заповнює поглиблення, а також постійне динамічне навантаження від потягу.

Земляне полотно будується за типовими поперечними профілями або індивідуальними проєктами (ДБН В.2.У – 2008 «Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм»). Поверхня земляного полотна повинна бути

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дефекти, деформації та пошкодження земляного полотна підлягають усуненню в процесі поточного утримання колії, при планово-запобіжних ремонтах верхньої будови колії, а також при ремонтах і підсиленні земляного полотна за індивідуальними проєктами.

Виконаємо більш детальний аналіз хвороб земляного полотна і виявимо їх причини. До дефектів земляного полотна відносяться розповзання насипу (рис. 1.1) – повільне осідання насипу зі зміною початкових обрисів як основної площадки, так і укосів.

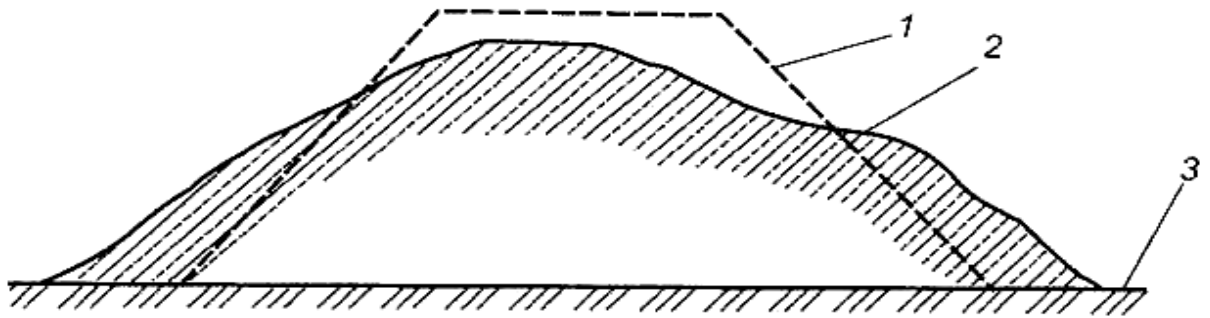


Рисунок 1.1 – Розповзання насипу:

1 – будівельний поперечний профіль насипу;

2 – поперечний профіль насипу після деформацій; 3 – основа насипу

Причини виникнення розповзання насипу: спорудження насипу з перезвожених глинистих або пилюватих ґрунтів; відсипання насипу в зимовий час із підвищеною кількістю в ґрунті мерзлих грудок, попадання в тіло насипу льоду, снігу; розрідження пливунних ґрунтів тіла насипу під дією поїзного навантаження; перезвоження поверхневими водами тіла насипу, спорудженого з пересушених недоущільнених ґрунтів; накопичення вологи в баластових ложах, мішках, гніздах. Особливою причиною виникнення цього дефекту є недостатнє ущільнення ґрунту під час будівництва (рис. 1.2).

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

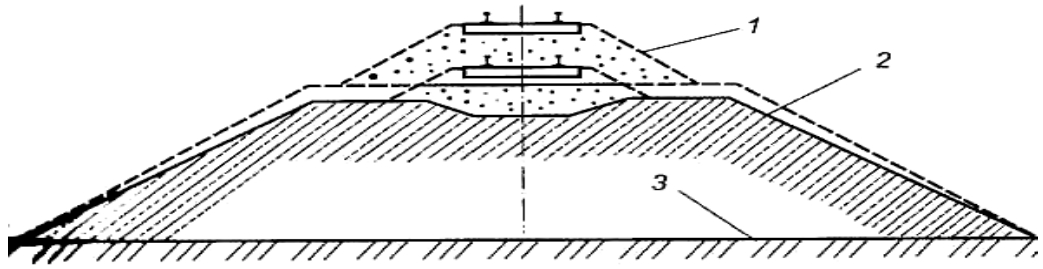


Рисунок 1.2 – Осідання насипу внаслідок ущільнення ґрунтів, що його складають: 1 – поперечний профіль насипу до осідання; 2 – обрис насипу після його деформацій; 3 – основа насипу

Причинами виникнення недостатнього ущільнення ґрунту під час будівництва є використання для зведення насипів гумусованих, засолених та інших подібних ґрунтів; порушення технології будівництва земляного полотна; недостатнє ущільнення ґрунтів, що укладаються в насип; низька якість утримання земляного полотна, що знижує міцнісні характеристики ґрунтів насипу й погіршує стан колії в цілому.

До деформацій основної площадки земляного полотна відносяться зсув (сповзання) насипу або його низової частини по похилій основі (рис. 1.3). Причинами виникнення такого дефекту хворого земляного полотна є неправильна підготовка косогірної основи насипу в період будівництва; незадовільне відведення поверхневих і ґрунтових вод від основи насипу; наявність в основі насипу похило розташованих і розріджених шарів ґрунту.

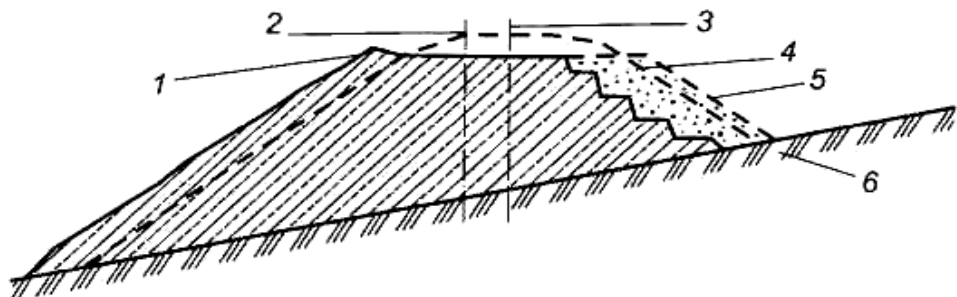


Рисунок 1.3 – Зсув (сповзання) насипу або його низової частини по похилій основі: 1 – брівка зриву; 2 – зсувний масив; 3 – тріщини на зсуві; 4 – поверхня ковзання зсуву; 5 – недеформований профіль; 6 – похила основа

										011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

перемінних навантажень від рухомого складу і сезонних діянь кліматичних факторів [16, 30].

На основі систематизації наукових поглядів сформульовано такі поняття:

– земляне полотно – це несуча земляна споруда, експлуатація якої має найвищу надійність за умови пружного стану, при цьому деформування системи постійно зростає до переходу споруди або її окремих ділянок у пластичний стан. Пружний стан ґрунтів складає 1/3 частини кривої при трьохвісному випробуванні;

– підшпальна баластна призма – це верхня будова земляної споруди – полотно із крупного кускового, міцного скельного матеріалу (щебеню), яка майже позбавлена властивостей пластичних деформацій. Енергія від поїздного навантаження у призмі витрачається на перетворення в тепло за рахунок тертя, при цьому призма володіє тільки пружними властивостями (у незабрудненому стані) і здатністю до самовідновлення стану та форми.

Вивчення фізичних явищ, які виникають під дією постійного руху поїздів із високою швидкістю, дозволило визначити, що від дії імпульсного навантаження у земляному полотні виникають, розповсюджуються і впливають поздовжні акустичні хвилі та поперечні вертикальні хвилі, які мають частотно-амплітудну складову. В результаті випробувань цієї складової визначено, що поздовжня хвиля від руху тягового електровозу в щільних ґрунтах розповсюджується швидше і досягає швидкості 3800 м/с у центрі земляного полотна, а на поверхні укосу – 180...200 м/с [7]. Ця хвиля має характер сейсмічної, розповсюджується на відстані до 50...100 м від земляного полотна і за малої частоти появ значно не впливає на споруди, а використовується в основному для врахування динамічної пружної константи при аналізі ґрунтів за виразом

$$E_{.g} = C_p^2 \cdot \rho, \text{ МПа}, \quad (1.1)$$

де C_p – швидкість розповсюдження поздовжньої хвилі, м/с; ρ – щільність

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

грунту, кг/м³. Слід відзначити, що ця складова розрахунків використовується (у вигляді коефіцієнтів) нормативними документами тільки при розрахунках сейсмічного впливу.

Головною задачею утримання баластної призми є підтримання її постійно в справному стані, який забезпечує стійку та надійну роботу колії під дією поїзного навантаження в усі пори року та при будь-яких кліматичних умовах, а також подовження терміну служби баластного шару.

Враховуючи вимоги нормативних документів, за яких достатньо висоти насипу із піску у 1 м до баластної призми для врахування динамічних властивостей руху, були досліджені вертикальні поперечні хвилі. В результаті аналізу вимірів виявлено, що для баластного шару найбільша роль належить вертикальній складовій. Особливо в районах стику величина її зростає у 2...3 рази вище, у порівнянні із другими ділянками.

Доведено, що чим більша швидкість рухомого складу, тим швидше переміщується навантаження через даний перетин колії і тим на меншу глибину проникає її вплив [3, 6]. На глибині 1 м від основної площадки при швидкості 50 км/год напруження у підрейковому перетині склали в середньому близько 43 % від напружень основної площадки, при швидкості 100 км/год – 38 %, а при швидкості 150 км/год – 32 %. Із збільшенням глибини напруження затухають і на глибині 2 м при тих же умовах складають (для швидкості 100 км/год) – 14 %, а на глибині 5 м – менше 1 %. Враховуючи це, можна впевнено свідчити, що на глибині тільки 5 м вплив динамічної вертикальної складової можливо не враховувати, а нормативне значення за сумою впливу сейсмічної поздовжньої та вертикальної хвиль недостатньо дослідженні і не враховуються.

Найбільш поширеними деформаціями і «хворобами» земляного полотна та баластного корита, що викликані причинами експлуатаційного характеру, є заглиблення, виникнення яких пов'язане з незадовільною роботою водовідвідних пристроїв; розмиви в місцях укріплень та інше.

Згідно [29] поточне утримання земляного полотна складається з систематичного нагляду за його станом, вивчення причин виникнення

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.МР.2020.000					

несправностей і деформацій, а також виконання необхідних поточних робіт по підтриманню земляного полотна та його споруд у справному стані. Поточне утримання земляного полотна та його водовідвідних, підсилюючих та інших споруд здійснюється безперервно протягом усього року і на всьому протязі колії, включаючи ділянки, де проводиться капітальний ремонт колії. Обсяги і строки виконання робіт по поточному утриманню земляного полотна встановлює шляховий майстер із урахуванням сезонних і місцевих умов і результатів періодичних наглядів. Отже, земляне полотно разом зі штучними спорудами служить постійною опорою для верхньої будови колії.

Конструктивно-технологічні рішення призначаються з метою підвищення стійкості основ, прискорення досягнення допустимої інтенсивності осідання, зменшення динамічного впливу від транспортних навантажень [21, 31-34]. В залежності від виду очікуваних результатів призначаються наступні рішення: попередня консолідація, тимчасове навантаження, зниження висоти насипу, зниження нахилу укосів, пальові конструкції, зміна слабких ґрунтів, піщані палі-дрени, бічні привантажувальні призми та контрбанкети, попереднє осушення, дренажні прорізи, збільшення висоти насипу, палі.

Оптимальний варіант технологічних і конструктивних рішень приймається з урахуванням техніко-економічного обґрунтування. Найбільш часто вживані технологічні конструктивні рішення для підсилення слабких основ земляного полотна та самого насипу.

Найбільш простим і достатньо ефективним методом підвищення несучої здатності слабкої основи і насипу є метод поступового завантаження шару (попередня консолідація) [32, 36]. Метод полягає в призначенні відповідного режиму зведення насипу для необхідного підвищення міцності слабого ґрунту розрахункового шару при додатковому ущільненні шарів, що відсипають. Необхідний режим зведення насипу визначається виходячи з умов $R_{\text{факт}} < R_{\text{без}}$, яке повинно дотримуватись в процесі спорудження насипу.

Метод тим ефективніше, чим інтенсивніше ущільнюється слабкий ґрунт. Глинисті ґрунти ущільнюються мало, тому цей спосіб в суглинках

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовують рідко. Розрахункову вологість ґрунту, що відповідає тій чи іншій величині осадки S_p визначають за формулою:

$$W_t = W_{поч} - (57 \frac{S_t}{S_{поч}} - 0,57)(W_{поч} - W_{кін}) \quad (1.2)$$

де $W_{поч} - W_{кін}$ – початкові та кінцеві вологості ґрунтів; S_t – осідання за будь-який період часу; $S_{кін}$ – кінцева (розрахункова) осадка при даному навантаженні.

Задаючись режимом завантаження реальним для конкретних умов перевіряється можливість його осушення шляхом порівняння величини безпечного навантаження на декілька моментів часу з фактичним навантаженням на ті ж моменти. Якщо безпечне навантаження буде менше фактичного, то необхідно змінити режим укладення ґрунтів і повторити розрахунок.

1.3 Підсилення земляного полотна шляхом армування геосинтетичними матеріалами

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

Крутизна укосів земляного полотна повинна відповідати вимогам Державних будівельних норм і типовим поперечним профілям. При відповідності обрисів земляного полотна типовим поперечним профілям розрахунковий коефіцієнт стійкості укосів земляного полотна повинен бути не менше 1,2. У випадку, якщо крутизна укосів насипу більша, ніж наведена в Державних будівельних нормах і Правилах України, але не перевищує 1:1,35, повинні бути проведені розрахунки стійкості укосів і баластних шлейфів, у тому числі з передбаченням проходження можливої поверхні зміщення по контакту глинистого ґрунту тіла земляного полотна й баластного шлейфа.

						011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Коефіцієнт стійкості повинен бути не менше 1,5. Земляне полотно повинно підсилюватися геосинтетичними матеріалами [31, 35, 38-42] (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Підсилення слабкої основи нового земляного полотна геосинтетичними матеріалами (геотекстильне полотно)

Підсилення геосинтетичними матеріалами є одним з найефективніших способів, а його основною особливістю є те, що такий ґрунт є геокмпозитною несучою конструкцією [5, 10, 13, 18, 22, 23, 52]. Звичайні дисперсні ґрунти практично не сприймають напруження розтягу, тому для їх компенсації в ґрунт укладають одиночні стрижні або каркаси, найчастіше з синтетичних матеріалів.

Аналізувалася пропозиція виготовляти і встановлювати в ґрунт палі особливої конструкції, які сприймають вертикальні навантаження і передають їх на шари з високою несучою здатністю, що залягають нижче [23, 45, 49]. Технологія виготовлення палі полягає у тому, що в сталеву трубу, занурену в ґрунт вібрспособом, закладають заздалегідь сформований у вигляді рукава геотекстиль. Внутрішній об'єм рукава заповнюють ґрунтом. Наступною операцією є витягання труби і ущільнення засипаного ґрунту, внаслідок чого геотекстиль розтягується по колу.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Підсилення земляного полотна малодеформативними шарами

Конструкцію з видаленням слабкого ґрунту передбачають в тих випадках, коли розрахунки показують неефективність і високу технологічну складність виконання всіх основних вимог до земляного полотна, що будується на слабкій основі. Як правило, заміна слабкого шару виконується при невеликій довжині ділянки, де необхідно замінити ґрунт [24, 46].

Проектування конструкції земляного полотна з заміною слабкого ґрунту виконують на основі техніко-економічного обґрунтування способу робіт. Слабкий ґрунт замінюють дренажним ґрунтом (пісок, гравій, мінеральна суміш, суглинок) та влаштовують перефільовання земляного полотна із створенням контрбанкетів або берм різного обрису.

Ряд авторів пропонують для укріплення верхньої будови колії використовувати різні матеріали, включаючи пінопласт, підбаластні плити з використанням в'язучих на основі цементів, фосфатів, вапна та інше. Проведені дослідження дозволили виявити, що в порівнянні з загальними конструкціями колії напруження в підрейковому перерізі знизилися на 15...45 %. Крім того, зменшилися остаточні деформації основного майданчика й просідання колії в цілому.

З початку 80-х років в залізничному будівництві і колійному господарстві залізниць в конструкціях земляного полотна почали вибірково застосовувати асфальт гарячого укладання – матеріал, подібний використовуваному в земляному полотні покриття автомобільних доріг [21] (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Підсилення земляного полотна малодеформативним шаром асфальту

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Підсилення земляного полотна за допомогою хімічного закріплення та бурозмішувальної технології

Достатньо широко використовується і такий метод підвищення несучої здатності основного майданчика, як хімічне закріплення ґрунтів. Його методи відомі і використовуються в будівництві порівняно давно. Найпоширенішими з них є цементація, технологія Jet Grouting, смолізація, силікатизація [3, 11, 14, 15, 44].

Цементація ґрунтів – це група методів технічної меліорації, заснована на введенні в ґрунт гідравлічних в'язучих, вживаних для зміцнення основ споруд, створення протифільтраційних завес, підсилення неоднорідних ґрунтів. Суть цього способу полягає в нагнітанні в пори укріплюваного ґрунту цементного розчину, при твердінні якого значно збільшується міцність і водонепроникність основи. Спосіб цементації застосовується для закріплення ґрунтів, розміри пір яких забезпечують вільне проникання частинок цементу. Найбільший ефект виходить при цементації крупноуламкових ґрунтів, крупних і середньої крупності пісків з коефіцієнтом фільтрації від 80 до 200 м/сут.

Суть технології Jet Grouting (бурозмішувальна) полягає у тому, що відбувається руйнування і перемішування ґрунту високонапірним струменем цементного розчину [11, 14, 15], що витікає під високим тиском з монітора, розташованого на нижньому кінці бурової колони. В результаті в ґрунтовому масиві формуються палі діаметром 0,6...1,5 м з нового матеріалу – ґрунтобетону з достатньо високими несучими і протифільтраційними характеристиками (рис. 1.10) [11, 27]. Влаштування паль з ґрунтобетону за технологією Jet Grouting виконується в два етапи: виконання прямого (буріння свердловини) і зворотного ходу бурової колони. В процесі зворотного ходу виконують підйом колони з одночасним її обертанням. При цьому піднімають тиск цементного розчину, що поступає в сопла монітора, створюючи струмінь з високою кінетичною енергією.

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)



б)



в)



г)



Рисунок 1.10 – Порядок робіт з підсилення земляного полотна за технологією Jet Grouting: а) встановлення бурової установки в робоче положення; б) буріння лідерної свердловини; в) підйом бурової штанги з одночасною подачею розчину через сопло монітору та перемішуванням ґрунту; г) створення ґрунтоцементної палі

Ґрунтоцементні палі, утворювані з використанням струменевої технології за технологією Jet Grouting, можуть бути круглого перетину, трилопатеві, чотирилопатеві, гвинтоподібні, а також січні. Комбінування трьох- і чотирилопатевих палей створює комірчасті структури, що можуть бути використані як несучі конструкції завдяки залученню в роботу ґрунту, що знаходиться в осередках.

Перевагами технології Jet Grouting є: висока продуктивність, простота, економічність, відсутність негативних ударних дій, можливість роботи в обмежених умовах (поблизу існуючих будівель), в складних інженерно-геологічних умовах, ефективність використання, як при реконструкції, так і при будівництві нових об'єктів.

Неоднорідні насипи можливо підсилювати шляхом армування їх

						011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

системою ґрунтоцементних паль, які споруджуються по бурозмішувальній технології (drilling-mixing technology). Така технологія передачі постійних і періодичних зусиль на щільні ґрунти виключає непрогнозовані деформації (осідання).

Альтернативна технологія робіт передбачає підсилення деформованих насипів шляхом армування їх системою ґрунтоцементних паль, які споруджуються по бурозмішувальній технології [27, 43, 48-50]. Така технологія передачі постійних і періодичних зусиль на щільні ґрунти виключає непрогнозовані деформації (осідання). Теоретичною основою для вибору такої технології можуть бути такі фактори [27, 43, 48-50]:

- шаруватий характер насипу із ґрунтів, що мають різну пористість, щільність і механічний склад;
- товщина шарів ґрунтів може змінюватись по довжині насипу;
- розташування в основі насипу просадочних ґрунтів, які необхідно підсилювати;
- неможливість повторного використання ґрунтів.

Армування таких насипів виконується в два етапи. Спочатку утворюють вертикальний екран ґрунтоцементними палями зовнішнього армування насипу при тиску подачі композиту 0,1...0,15 МПа, а потім утворюють ґрунтоцементні палі внутрішнього масиву під тиском 0,3...0,3 МПа. Така технологія дозволяє виключити необхідність розробки, транспортування і складування великої кількості матеріалу діючого насипу, розвідку і дослідження ґрунту для нового насипу, а також укладення цього ґрунту і шарове укладення, трамбування і ущільнення нового насипу.

Застосування ґрунтоцементних паль для поліпшення насипів дозволяє отримати масив будь-якої міцності за рахунок регулювання кількості композитів, швидкості обертання робочого інструменту і глибина заглиблення в ґрунт.

Технологія влаштування ґрунтоцементних паль полягає в механічному перемішування і додатковій гідромоніторній розробці і перемішування ґрунтоцементної суміші, що складають палі. Ґрунтоцементні палі можна

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формувати як в сухих, так і в вологих ґрунтах. Розрахунок кількості композиту для утворення ґрунтоцементних паль проводиться на основі лабораторних даних. Одним із важливих моментів при виборі бурозмішувальній технології закріпленні порід є вибір і використання закріплюючих розчинів. Закріплюючі розчини повинні відповідати наступним вимогам [27, 43, 48-50]:

- здатністю не розділятися на шари при нагнітанні;
- водостійкістю, тобто здатністю тужавіти під водою;
- строками тужавлення, що забезпечуються відповідними умовами;
- технологічністю процесу приготування і нагнітання розчину для закріплення;
- достатньою міцністю на одноосний стиск;
- здатністю перемішуватись з ґрунтами, що необхідно закріпити;
- необхідною водовіддачею після завершення після технологічного процесу.

До основних технологічних параметрів відноситься швидкість підйому V і обертання W монітора, тиск розчину, що нагнітається P , діаметр колони d , межа міцності на стиск $\sigma_{ст}$. Теоретично максимальна кількість композиту може бути рівною пористості ґрунту. При цьому досягається максимально можлива об'ємна маса ґрунту, але практично змішувати таку кількість композиту з ґрунтом немає необхідності. Як правило, міцність і об'ємна маса кожного випадку є розрахунковими величинами.

Для улаштування ґрунтоцементних паль (рис. 1.11) використовують портландцемент, шлакопортландцемент, сульфатостійкий цемент тощо. Для забезпечення переміщення суміші і її твердіння використовують пластифікатори, суперпластифікатори, сповільнювачі тужавлення. Кількість добавок повинно бути від 1 до 4 % від об'єму цементу [27]. Водоцементне відношення підбирається в залежності від геологічних умов, пористості і вологості ґрунту, його гранулометричного складу а також по результатам виконаних робіт на дослідній ділянці, створення якої є обов'язковим.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

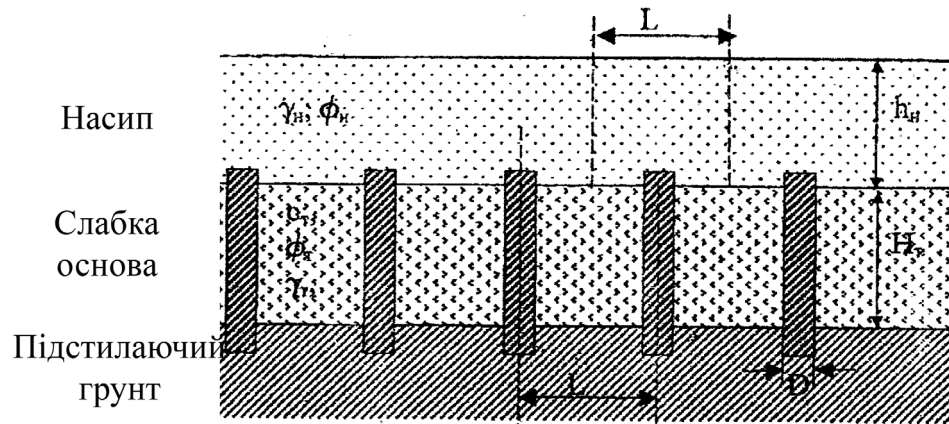


Рисунок 1.11 – Схема розташування паль

Всі роботи повинні проводитись в присутності представника проектної організації і розробника технології. Ґрунтоцементні палі при необхідності можна армувати по всій довжині, або верхній частині в якості арматури використовують арматурні стержні, металеві каркаси і інші матеріали і елементи конструкцій.

В залежності від конкретних умов підсилення земляного полотна жорсткими палями здійснюється для підвищення стійкості, для отримання практично мінімальних деформацій основ земляного полотна при природних механічних властивостях слабкої поверхні ґрунтів.

При розрахунку пальної основи визначають оптимальні параметри: 1) діаметр паль; 2) відстань між палями; 3) міцність матеріалу паль.

Необхідна міцність матеріалу паль при відсутності ростверку визначається за формулою (рис. 1.12, 1.13):

$$\sigma_{\text{пал}} = \frac{1,2\gamma \left[L^2 h_n - \frac{1}{3 \operatorname{tg} \varphi} (L - D)^2 \times (D + L) \right]}{D^2} \quad (1.3)$$

де L – відстань між палями в осях, м; γ – питома вага ґрунту насипу т/м³,
 h_n – висота насипу; D – діаметр паль, м; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту насипу.

						011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$D_{\text{м.п.}} = \frac{1,3g}{3tgj} (L - D) \frac{H_T}{E_0} \quad (1.5)$$

де H_T – товщина шару, що стискається; E_0 – компресійний модуль деформації слабкого шару.

Допустима осадка $\Delta_{\text{доп}}$ не повинна перевищувати 10 см. Якщо розрахункова осадка буде більшою $\Delta_{\text{доп}}$, то необхідно влаштувати між палями гнучкого ростверку з 1...3 шарів геотекстиль відповідної міцності і жорсткості.

Конструкцію з видаленням слабкого ґрунту передбачають в тих випадках, коли розрахунки показують неефективність і високу технологічну складність виконання всіх основних вимог до земляного полотна, що будується на слабкій основі. Як правило, заміна слабкого шару виконується при невеликій довжині ділянки, де необхідно замінити ґрунт.

Проектування конструкції земляного полотна з заміною слабкого ґрунту виконують на основі техніко-економічного обґрунтування способу робіт. Слабкий ґрунт замінюють дренаючим ґрунтом (пісок, гравій, мінеральна суміш, суглинок).

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Методика математичного моделювання земляного полотна з допомогою комплексу SCAD

2.1 Засади визначення напружено-деформованого стану на основі методу скінченних елементів

Метод скінченних елементів (МСЕ) з деякою мірою наближення дозволяє розраховувати напружено-деформований стан середовища, в тому числі і земляного полотна в пружній постановці. При рішенні крайових задач механіки ґрунтів зручно виходити з варіаційного принципу Лагранжа, коли на дійсних переміщеннях повна потенційна енергія даного об'єму пружного ґрунтового середовища досягає мінімуму [19, 20, 25, 26]. Інакше кажучи, рішення задач МСЕ зводиться до задачі про мінімізацію функціонала [20]. Розрахунок напружено-деформованого стану земляного полотна МСЕ передбачає виконання ряду операцій.

Вирішення задачі в загальному вигляді зводиться до визначення у кожній точці тіла компонентів переміщень, напружень та деформацій:

$$\left. \begin{aligned} u &= f_1(x, y, z); \\ &\dots\dots\dots \\ \sigma_x &= f_4(x, y, z); \\ &\dots\dots\dots \\ \tau_{xy} &= f_7(x, y, z); \\ &\dots\dots\dots \\ \varepsilon_x &= f_{10}(x, y, z); \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

										011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(u, v, w) - \mathcal{E}(Q, P) \quad (2.3)$$

Загальний вигляд рівняння потенційної енергії деформації тіла та потенціалу зовнішніх сил встановлюється з аналізу рівнянь отриманих способом вираження потенційної енергії деформації як функції від переміщень (за допомогою рівняння Коші).

$$\mathcal{E}(u, v, w) = G \iiint_V \left\{ \begin{aligned} & \frac{1-\mu}{1-2\mu} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ & + \frac{2\mu}{1-2\mu} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} dV \quad (2.4)$$

Тоді потенціал зовнішніх сил виражається, як:

$$\mathcal{E}(Q, P) = \iiint_V (Q_x u + Q_y v + Q_z w) dV + \iint_{\Omega} (P_x u + P_y v + P_z w) d\Omega, \quad (2.5)$$

де $Q_x, Q_y, Q_z, P_x, P_y, P_z$ – проекції об'ємних та поверхневих сил, що діють на одиницю об'єму чи поверхню тіла, на вісі x, y, z .

Оскільки тіло, яке розглядається, складається з кінцевої кількості окремих елементів, інтегрування в рівняннях треба замінити на сумування. З вище наведеного рівняння видно, що потенційна енергія деформації тіла є квадратичною функцією від переміщень його точок. З рівняння 1 переміщення точок тіла є функціями першого ступеню від переміщень вершин елементів. Тоді потенційна енергія деформації тіла може бути представлена як квадратична функція від u_i, v_i, w_i , тобто:

$$\mathcal{E}(u, v, w) = \sum_{i=1}^n \left[\alpha_i u_i^2 + \beta_i v_i^2 + \gamma_i w_i^2 + 2(\delta_i u_i v_i + \varepsilon_i v_i w_i + \xi_i w_i u_i) \right] \quad (2.6)$$

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З рівняння (2.6) видно, що потенціал зовнішніх сил виражений функцією першого ступеню від переміщень точок тіла, або, враховуючи рівняння (2.1) – від переміщень вершин елементів

$$\mathcal{E}(Q, P) = \sum_{i=1}^n (F_{xi} u_i + F_{yi} v_i + F_{zi} w_i) \quad (2.7)$$

де F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} , – компоненти зовнішніх сил, прикладених у вершинах елементів.

Подальший аналіз проводиться у матричному вигляді.

Позначимо вектор компонентів переміщень вершин елементів, що складають тіло, матрицею – стовпцем.

Тоді транспонований вектор переміщень вершин елементів буде виражатися матрицею-строчкою:

$$\{U\} = \{u_1 u_2 \dots u_n v_1 v_2 \dots v_n w_1 w_2 \dots w_n\} \quad (2.8)$$

Вираз потенціальної енергії деформації тіла можна записати у матричній формі наступним чином:

$$\mathcal{E}(u, v, w) = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\} \quad (2.9)$$

Тоді рівняння потенційної енергії системи для цього випадку у матричній формі буде мати вигляд

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\} - \{U\}^T \{F\} \quad (2.10)$$

Для визначення дійсних переміщень вершин елементів, що складають досліджуване тіло, знаходиться мінімум потенційної енергії системи, тобто

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівняння потенційної енергії диференціюється за невідомими та отримані рівняння прирівнюються до нуля. Після здійснення операції диференціювання отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial u_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\alpha_i u_i + \delta_i v_i + \xi_i w_i) ; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial v_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\beta_i v_i + \delta_i u_i + \varepsilon_i w_i) ; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial w_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\gamma_i w_i + \varepsilon_i v_i + \xi_i u_i) ; \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial u_i} &= \sum_{i=1}^n F_{xi} ; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial v_i} &= \sum_{i=1}^n F_{yi} ; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial w_i} &= \sum_{i=1}^n F_{zi} ; \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Оскільки

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_i} &= \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial w_i} - \\ &- \left[\frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial w_i} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

то з виразів, використовуючи матриці, отримуємо

$$\{F\} = [K]\{U\}. \quad (2.14)$$

Це і є основне матричне рівняння методу скінченних елементів.

Для успішного вирішення задачі розрахунку напружено-деформованого стану велике значення має тип розрахункової схеми, що приймається, і порядок

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідеалізації реального земляного полотна. Розрахункова схема може розглядатися як сукупність граничних умов, зовнішніх і внутрішніх дій, властивостей матеріалів і називається скінченно-елементною моделлю (СЕ-моделлю). Її елементами в загальному вигляді є будь-які об'єкти, які можуть брати участь в розрахунку або просто повинні бути зображені на схемі, як допоміжні умовні позначення. Елементи СЕ-моделі, що беруть участь в розрахунку, повинні бути здатні самостійно відтворювати графічно результати рішення або передавати їх постпроцесору для побудови ізоліній та ізополів.

Відповідно до строгих рішень теорії пружності повне розсіювання напружень в пружному середовищі відбувається в нескінченному видаленні від місця додатку навантаження. У реальних середовищах практично повне розсіювання напружень, а, отже, і загасання переміщень, настає значно швидше. Тому розрахунок напружень і переміщень зводиться до визначення цих величин в деякій обмеженій області. Межі області встановлюються так, щоб за її межами збурення природного поля напружень додатковим навантаженням було б відносно невелике, тобто не привело до помітних деформацій.

Цією умовою слід користуватися для обмеження області, в якій визначається напружено-деформований стан земляного полотна. Надмірне збільшення області дослідження призводить до збільшення кількості елементів, що ускладнює розрахунок, або до збільшення розмірів цих елементів, що знижує точність рішення. Зменшення області дослідження може призвести до того, що вплив граничних умов внесе спотворення в напружено-деформований стан її периферійних ділянок. При призначенні сітки дискретизації (розбивки), як правило, слід дотримуватися наступних основних принципів.

У безпосередній близькості від прикладених навантажень, на ділянках, де визначення напружень повинне бути виконане з великою точністю, особливе в місцях, де очікуються найбільші градієнти напружень, слід призначати трикутні елементи якнайменших розмірів. Це дозволяє точніше встановити поле напружень на таких ділянках і понизити погрішність через його розриви.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

011.196103.MP.2020.000

Відповідно, на ділянках, де очікується плавна зміна напружень, розміри елементів можна збільшувати. Оскільки поле переміщень в рішеннях методом скінченних елементів безперервне, для задач, що вимагають визначення лише переміщень, можна використовувати грубішу сітку розбиття.

Якщо наперед складно визначити ділянку області, де слід деталізувати дослідження напружено-деформованого стану, можливе поетапне рішення задачі. У першому етапі задача розв'язується при відносно грубій сітці розбиття і для цієї сітки будується поле переміщень. Потім виділяється необхідна ділянка області, для чого будується детальна сітка розбиття, приймаються граничні умови в переміщеннях на основі попереднього рішення і задача доводиться до розрахунку напружень і деформацій.

Доцільно призначати таку сітку розбивки, щоб можна було скласти достатньо просту залежність, що зв'язує координати вузлових точок з номерами вершин. Всі види навантажень в методі скінченних елементів приводяться до зосереджених сил, прикладених у вузлових точках. Розподілене навантаження, діюче на якій-небудь поверхні, замінюється рівнодіючими зосередженими силами, які прикладаються до відповідних вузлів. Об'ємні сили, наприклад власна вага, також приводяться до зосереджених сил, діючих у вузлових точках.

При використанні МСЕ велику роль виконує точне визначення міцнісних і деформаційних характеристик ґрунтів насипу і основи, оскільки від них залежить напружено-деформований стан земляного полотна, і чим точніше будуть визначені ці характеристики, тим ближче до реальних значень виявляться одержані в результаті розрахунків величини напружень і деформацій.

Важливим етапом при розрахунках напружено-деформованого стану методом скінченних елементів є обробка і представлення результатів. Якщо кінцевою метою рішення задачі є визначення поля переміщень, то представлення результату стає простим. Відповідно до того, що переміщення будь-якої точки області є лінійною функцією координат, при відомих значеннях

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.МР.2020.000					

переміщень вузлових точок легко визначаються переміщення всіх інших. Практика показує, що точність рішення в цьому випадку достатньо висока навіть при грубій схемі дискретизації. Найбільші погрішності можуть мати місце поблизу області з різко різними показниками.

Значно складніше представлення результатів у вигляді полів напружень і деформацій. Ці поля мають розриви на межах між елементами. Значення напружень і деформацій залишаються постійними в межах кожного елемента, тобто можуть бути віднесені до будь-якої його точки. При недостатньо детальній сітці розбиття це може привести до грубого наближення. У будь-якому випадку, при кінцевих, хоч би і малих, розмірах елементів доводиться відносити набуті в розрахунку значення напружень і деформацій до деяких точок в межах елемента.

При побудові моделі МСЕ слід враховувати повні значення напружень і деформацій, які можна визначити в ході лабораторних випробувань ґрунтових зразків. Проте, розрахункові рівняння МСЕ не слід ускладнювати обліком ділатансії, оскільки даний ефект достатньо складно відобразити в рівняннях методу, при цьому уточнення рішення незначне [8, 37].

Враховуючи, що ґрунт земляного полотна приймається як середовище, яке практично не чинить опір розтягуванню, відповідно відбувається аналіз і напружень, які викликають такий вид деформації, приймаючи припущення, що можливо поява тріщин перпендикулярна утворенню головної напруження σ_1 , причому друге головне напруження повинне задовольняти умові $0 \geq \sigma_2 \geq -\frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ [37]. Слід підкреслити, що матеріал заповнювача для спрощення розрахунків приймався, як вже було сказано вище, пружним для діапазону навантажень, що прикладаються, що доводиться випробуваннями його фізико-механічних властивостей.

Невідомі головні напруження σ_1^p і σ_2^p повинні задовольняти умові текучості:

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F^p = \frac{\sigma_1^p - \sigma_2^p}{2} + \frac{\sigma_1^p + \sigma_2^p}{2} \sin \varphi - C \cos \varphi = 0. \quad (2.15)$$

Визначення тензорів напружень і деформацій виконується після проведення повного циклу ітераційної процедури і є стандартною матричною операцією МСЕ, яка детально описана в багатьох фундаментальних роботах і не є новою. Практично аналітичні положення реалізуються надалі в професійному ліцензійному комплексі Structure CAD for Windows, version 7.31 R.4 (SCAD) [12, 20, 47], в якому виконані всі числові розрахунки для укріпленого земляного полотна з різними варіантами підсилення.

2.2 Методика розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна

Методика розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна, що враховує наявність в конструкції елементів підсилення, базується на положеннях, прийнятих в роботах [25, 26]. Ґрунт є середовищем, що нелінійно деформується, але, як вже було детально викладено вище, діапазон діючих навантажень, а також можливість урахування нелінійності шляхом зміни деформаційних властивостей дозволяє застосувати теорію лінійної деформації для аналізу напружено-деформованого стану.

Урахування властивостей елементів підсилення, створених за допомогою бурозмішувальної технології, здійснюється введенням в розрахункову схему елемента з товщиною і деформаційними характеристиками, одержаними на основі результатів лабораторних випробувань [47-51]. Визначення напружень і деформацій ґрунтових масивів ведеться в умовах плоскої задачі теорії пружності. У пружному стані ґрунтове середовище підкоряється закону Гука. Числове рішення поставленої задачі виконується методом скінченних елементів виходячи з варіаційного принципу Лагранжа, коли на дійсних переміщеннях повна потенційна енергія даного об'єму ґрунтового середовища досягає мінімуму.

										011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Першим кроком є визначення геометричних параметрів ділянки земляного полотна, що підлягає розрахунку. У розрахунковому поперечному перетині за даними інженерно-геодезичного обстеження або за наявними даними проєктної документації визначаються: висота насипу, крутизна укосів, ширина основного майданчика земляного полотна, ширина узбіччя, ширина плеча баластної призми, а також інші геометричні параметри, що впливають на конфігурацію земляного полотна на даній ділянці.

Другим кроком є визначення геологічної будови земляного полотна і основи, а також визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів. Геологічна будова земляного полотна і основи визначається за результатами інженерно-геологічного обстеження ділянки або за наявними даними проєктної документації. При інженерно-геологічному обстеженні визначаються потужності шарів ґрунтових матеріалів, і виробляється відбір зразків ґрунту.

Вказаними вище способами визначаються:

- модуль деформації ґрунту E ;
- модуль поперечної деформації ґрунту (коефіцієнт Пуассона) μ ;
- коефіцієнт зчеплення ґрунту C ;
- кут внутрішнього тертя ґрунту φ ;
- питома вага ґрунту q .

Важливим кроком є визначення величини і характеру діючого навантаження. Величини навантажень від рухомих складів, що доводяться на 1 погонний метр, в розрахунковій схемі приймаються відповідно до результатів, одержаних при розрахунках за правилами розрахунку колії на міцність [2, 6]. Заздалегідь встановлюються тип і необхідні для розрахунку параметри існуючого або перспективного рухомого складу, тип існуючої або перспективної верхньої будови колії. Значення вертикальних навантажень по довжині шпали визначаються з використанням ординат епюри напружень під подошвою шпали. Для спрощення розрахунків приймається лінійна залежність розподілу напружень упоперек і уздовж шпали (рис. 2.1) [6].

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.МР.2020.000				

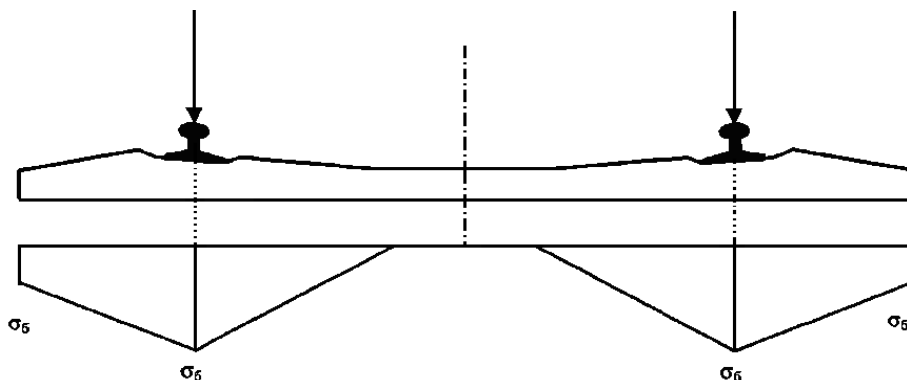


Рисунок 2.1 – Епюра розподілу вертикальних напружень під подошвою шпали

Четвертим кроком є урахування елементів підсилення, створеними за допомогою бурозмішувальної технології. Моделювання його армуючих функцій виконується введенням в розрахунок властивостей ґрунтоцементу, який відтворює особливості армування.

Процедура скінченно-елементної дискретизації і побудова системи лінійних рівнянь алгебри щодо вузлових переміщень починається із створення розрахункової схеми. При розрахунках напружено-деформованого стану земляного полотна можливо розробляти розрахункову схему у вигляді половини поперечного профілю. Як показав аналіз багатоваріантних розрахунків на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ), такі розрахункові схеми достатньою мірою відображають напружено-деформований стан земляного полотна під впливом рухомого навантаження.

Поперечний перетин земляного полотна розбивається не менш ніж на 20000...30000 скінченних елементів. Проведені численні розрахунки з різними варіантами розбиття поперечника на елементи показали, що дана кількість елементів є оптимальною для вирішення поставленої задачі. Подальше збільшення кількості елементів приводить до більшої точності розрахунків, але незначно. Поперечник розбивається на елементи із згущуванням скінченно-елементної сітки у напрямі горизонтальної осі під рейко-шпальною решіткою, тобто в місцях очікуваних підвищених градієнтів напружень і переміщень. Крім того, у напрямі вертикальної осі згущування скінченно-елементної сітки повинне посилюватися у міру наближення до рівня основного майданчика

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.МР.2020.000					

земляного полотна. Це пов'язано, перш за все, із задачами розрахунку і з місцем розташуванням армуючого прошарку.

При призначенні сітки розбивки необхідно враховувати також інженерно-геологічну будову земляного полотна і основи. Дискретизація на елементи виконується так, щоб в межах одного елементу фізико-механічні властивості ґрунтів були постійними. Таким чином, межа якого-небудь ґрунтового шару в розрахунковій схемі буде сукупністю меж виділених скінченних елементів. Фізико-механічні властивості ґрунтів, що складають земляне полотно і основу, враховуються при описі скінченних елементів.

Значення вертикальних навантажень по довжині шпали визначаються з використанням ординат епюри напружень під подошвою шпали. Для проведення розрахунків в умовах плоскої задачі у вузлах прикладається погонне навантаження на один метр колії. Ці сили і приймаються для подальшого розрахунку.

Набуті в результаті розрахунку значення напружень і деформацій рекомендується приводити до вузлових точок сітки. Тобто, якщо в деякій точці даного об'єднання сходяться трикутні елементів, для яких визначені компоненти напружень і деформацій, то усереднюють ці компоненти щодо вузлової точки і прикладають набуті значення в ній. Повторні рішення застосовуються при зміні густини сітки розбиття на окремих ділянках або при коректуванні деформаційних характеристик середовища.

Зміну густини скінченно-елементної сітки необхідно застосовувати, якщо апріорі не вдається визначити область земляного полотна, де слід деталізувати дослідження напружено-деформованого стану. Тоді в першому етапі задача розв'язується при відносно грубій сітці розбивки і для цієї сітки будується поле переміщень. Потім виділяється необхідна ділянка області, для чого будується детальна сітка розбивки, приймаються граничні умови в переміщеннях на основі попереднього рішення і задача доводиться до розрахунку напружень і деформацій.

Аналітичні побудови, що використовують математичний апарат теорії

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пружності, справедливі тільки при лінійній залежності між напруженнями і деформаціями у всьому інтервалі діючих напружень, тобто при постійних значеннях показників деформується. Облік нелінійної залежності між напруженнями і деформаціями зводиться до послідовних наближень. Спочатку (у першому циклі розрахунку) задача розв'язується при заданих величинах показників деформується в різних областях земляного полотна і основи.

2.3 Алгоритм математичного моделювання в комплексі SCAD

Проектно-обчислювальний комплекс (ПОК) SCAD [12] призначений для чисельного дослідження на персональній електронно-обчислювальній машині (ПЕОМ) напружено-деформованого стану конструкцій. ПОК SCAD забезпечує дослідження широкого класу конструкцій, причому розрахунки виконуються на статичні й динамічні навантаження. Досліджувані об'єкти можуть мати довільні обриси, локальні ослаблення у вигляді отворів і порожнин різної форми, різні умови обпирання, що важливо для виконання розрахунку земляного полотна. Алгоритм математичного моделювання в комплексі SCAD запозичений з робіт [25, 26], в яких детально викладено володіння цим елементом математичного моделювання.

У ПОК SCAD розроблена розвинена бібліотека СЕ, яка вміщує стрижні, чотирикутні й трикутні елементи плити, оболонки, чотирикутні й трикутні елементи плити на пружній основі; просторові елементи у вигляді тетраедра, паралелепіпеда, гексаедра загального виду; одновимірний і двовимірні (трикутні й чотирикутні) елементи для розв'язання осесиметричної задачі теорії пружності; спеціальні елементи, що моделюють зв'язок кінцевої жорсткості, пружну піддатливість між вузлами.

В основу комплексу покладено систему функціональних модулів, пов'язаних між собою єдиним інформаційним середовищем. Це середовище називається **проектом** і містить повну інформацію про розрахункову схему, її граничні умови, характеристики жорсткості, навантаження та їх комбінації, причому інформація наводиться у внутрішніх форматах комплексу й

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.МР.2020.000				

зберігається на диску у файлі (з розширенням **SPR**). Імена проєкту й файлу задаються під час створення нової схеми.

Під час створення проєкту виконується алгоритм, який пов'язаний із роботою з **функціональними модулями SCAD**. Функціональні модулі SCAD діляться на чотири групи. Перша група (**графічний препроцесор і графічний постпроцесор**) – модулі, які забезпечують уведення початкових даних в інтерактивному графічному режимі й графічний аналіз результатів розрахунку. Друга група – модулі для виконання статичного й динамічного розрахунків (**процесор**), а також обчислення розрахункових поєднань зусиль, комбінацій завантажень, головних і еквівалентних напружень, реакцій, навантажень на фрагмент схеми, аналіз стійкості (**розрахункові постпроцесори**). Документування результатів розрахунку виконується модулями третьої групи. Четверта група – модулі проєктування (**постпроцесори моделювання**), які служать для підбору арматури в елементах залізобетонних конструкцій, а також перевірки опору й підбору перерізів елементів сталевих конструкцій [25, 26].

Модульна структура дає можливість сформувати для кожного користувача таку конфігурацію SCAD, яка максимально відповідає його потребам за класом вирішуваних задач, засобами створення розрахункових схем, аналізом і документуванням результатів розрахунку. Усі функціональні модулі комплексу реалізовані в єдиному графічному середовищі. Інтерфейс, сценарії взаємодії користувача із системою, функції контролю початкових даних і аналізу результатів повністю уніфіковані, що забезпечує мінімальний час освоєння комплексу й логічну послідовність виконання операцій. Високопродуктивний процесор дозволяє розв'язувати задачі статички й динаміки з великою кількістю степенів вільності.

Розрахунок супроводжується докладним протоколом, який може бути проаналізований як у ході виконання розрахунку, так і після його завершення. Система контролю початкових даних виконує перевірку розрахункової схеми й фіксує всі знайдені помилки й попередження. Для успішного розв'язання задач пошуку НДС конструкцій земляного полотна достатньо користуватися трьома

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.MP.2020.000					

групами модулів [25, 26].

Алгоритм розрахунку земляного полотна з допомогою комплексу SCAD такий (назви закладок автентичні закладкам комплексу):

1. Створити робочий файл комплексу SCAD.
2. Зайти в розділ комплексу **Расчетная схема**.
3. Зайти в закладку **Схема** та виконати генерацію схеми земляного полотна згідно з наданими у посібнику рекомендаціями, задати їй реальні деформаційні характеристики.
4. Вийти із закладки **Схема**, зайти в закладку **Назначения** та поставити зв'язки у вузлах, якщо треба – коригувати жорсткість схеми відповідно до властивостей земляного полотна.
5. Вийти із закладки **Назначения** та зайти у закладку **Загружения**. Виконати операцію з прикладення навантаження.
6. Виконати модифікацію проєкту та його розміщення на жорсткому диску комп'ютера.
7. Вийти у дерево проєкту.
8. Виконати розрахунок під закладкою **Линейный**.
9. Зайти у **Результаты**.
10. Виконати аналіз результатів у закладці **Графический анализ**.
11. Виконати друк таблиць для отримання результатів.
12. Закрити робочий файл комплексу SCAD.

2.4 Відомості про роботу з основними модулями ПОК SCAD

Відомості про роботу з основними модулями ПОК SCAD наведені за матеріалами посібника та методичних вказівок [25, 26].

Графічний препроцесор. Для формування геометрії розрахункових схем у ПОК SCAD передбачено широкий комплекс створення схем за параметричними прототипами конструкцій, генерації сіток елементів на площині й у просторі, копіювання фрагментів схем, складання з підсхем і груп, різні функції геометричних перетворень. У режимі графічного діалога

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

задаються всі основні параметри схем, включаючи деформаційні характеристики елементів, умови спирання й примикання, статичні й динамічні навантаження тощо.

Набір засобів модифікації геометрії розрахункової схеми включає різні види геометричних перетворень, які дозволяють змінити масштаб всієї схеми або виділеного фрагмента, здійснити поворот навколо заданої осі, виконати дзеркальне відбиття, перенести частину схеми на вказану відстань тощо. Разом з широкою гамою засобів роботи з вибраними вузлами й елементами ці функції дають можливість створити розрахункову модель практично будь-якої складності.

Графічний постпроцесор. Важливим етапом розрахунку моделей є аналіз результатів розрахунку, які можуть бути подані у вигляді ізоліній та ізополів переміщень та напружень. Одночасно на схемі можуть виводитися й чисельні значення параметрів. Для статичних і динамічних навантажень передбачена можливість анімації процесу деформації схеми й запису цього процесу у форматі відеокліпу (файл з розширенням **AVI**). Будь-яка графічна інформація може виводитися на друк або зберігатися у форматі Windows Metafile (файл з розширенням **WMF**).

Також у комплексі реалізовані система фільтрів, функції фрагментації і колірні шкали, які забезпечують оперативний доступ до всіх видів результуючої інформації. Важливо, що при цьому є можливість виділити ту частину розрахункової схеми, на якій реалізувалися результати із заданого діапазону величин, приховавши решту частини схеми.

Фільтри. В умовах великих схем важливим процесом стало перенесення уваги від функцій формування до функцій контролю створеної схеми. Головну роль тут виконує реалізована в SCAD розвинена система фільтрів, за допомогою яких встановлюються правила відображення інформації на схемі, а також функції візуалізації і фрагментації схеми. Фільтри дозволяють відібрати для відображення інформацію про розрахункову схему за десятками критеріїв. При цьому широко використовуються колірні засоби відображення вибраної

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

011.196103.MP.2020.000

інформації, які спільно з фрагментацією дозволяють відобразити будь-які параметри незалежно від розмірності моделі.

Документування результатів. Модулі документування результатів розрахунку дозволяють сформувати таблиці з початковими даними й результатами в текстовому або графічному форматах, а також експортувати їх в Microsoft Word або Microsoft Excel. Формування таблиць виконується з урахуванням груп вузлів і елементів, таблиці можна доповнити коментарями й включити в них графічну інформацію. Таким чином, звітний документ може редагуватися засобами Windows і набувати зручної для конкретного користувача форми (наприклад, відповідно до прийнятого в його фірмі стандарту), а експорт в Microsoft Excel дає можливість подальшої нестандартної обробки результатів стосовно конкретних обставин використання.

2.5 Основні операції зі створення моделі земляного полотна

У цьому розділі надано вибірккову інформацію про створення розрахункових схем земляного полотна, реалізованих як параметричні прототипи, причому скінченно-елементні моделі є просторовими на основі об'ємних СЕ, тому інші моделі (стрижневі, пластинчасті тощо) розглядаються менш детально. Таким чином, викладені принципи створення моделей не є загальними, тому для більш повного ознайомлення із створенням різних типів моделей слід звернутися до спеціальної літератури [12, 25, 26]. Подальший виклад інформації є вибіркковим для того, щоб створювати лише визначений тип схем (деякі функції свідомо не розглядаються) [25, 26].

Усі операції зі створення, розрахунку та аналізу моделі виконуються курсорами, які пересуваються на моніторі за допомогою комп'ютерної миші.

У комплексі використовуються чотири типи курсорів.

Більшість операцій формування розрахункових схем зосереджена в розділі **Схема інструментальної панелі** (рис. 2.2).


					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після введення вузлів активізуємо в розділі **Схема** функцію **Формирование треугольной сетки конечных элементов** на площині. У результаті в інструментальній панелі стануть доступні кнопки управління режимом триангуляції (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Кнопки управління режимом триангуляції

Для триангуляції заданої області необхідно виконати таку послідовність операцій:

1) натиснути кнопку **Задание контура**  і обвести «гумовою ниткою» опорні вузли зовнішнього контуру (під «опорними» мають на увазі вузли, що лежать в кутових точках контуру). Для прикладу показане завдання контуру для земляного полотна, що має висоту 4 метри (рис. 2.5);

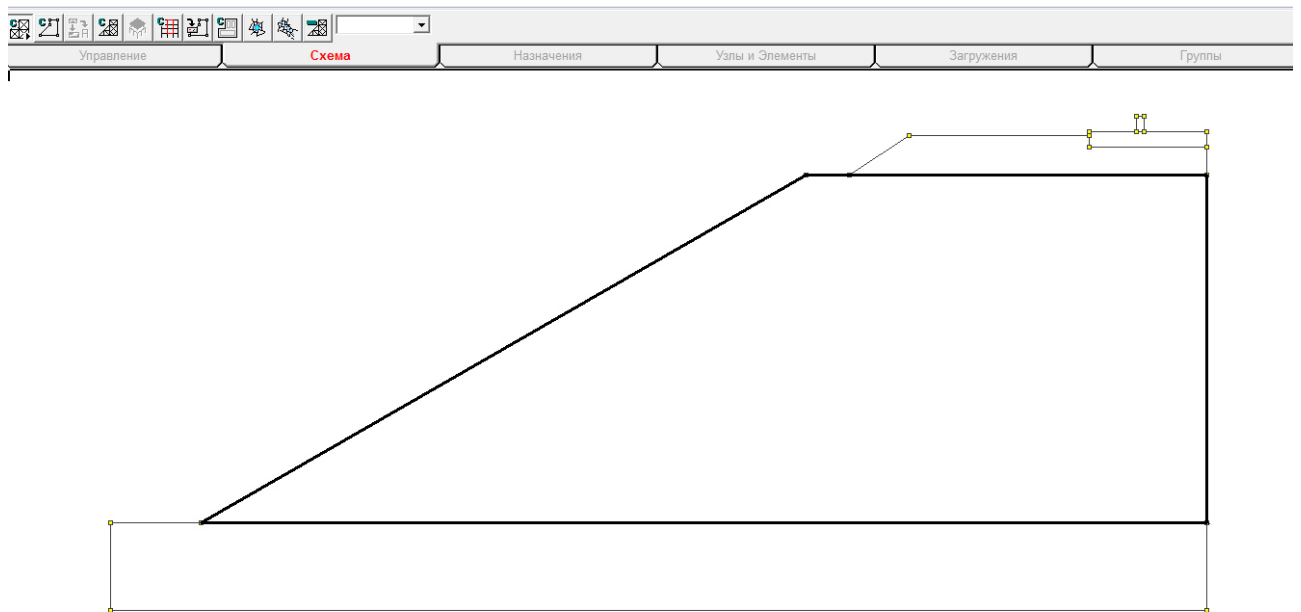


Рисунок 2.5 – Завдання контуру для фрагменту моделі (земляне полотно)

2) натиснути кнопку **Задание контура** і за потреби обвести «гумовою ниткою» опорні вузли внутрішнього контуру;

3) повторити попередню операцію для всіх внутрішніх контурів, щоб отримати контури триангуляції для усіх елементів системи (рис. 2.6);

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

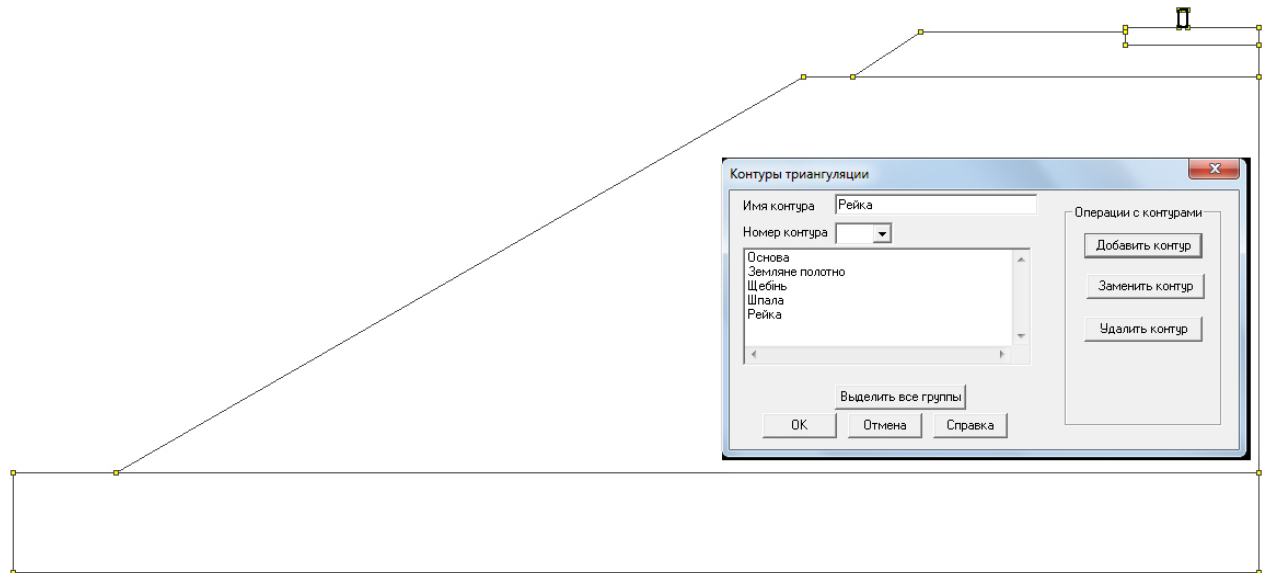



Рисунок 2.6 – Контур триангуляції для всієї розрахункової схеми

4) натиснути кнопку **Генерация сетки конечных элементов**  і встановити в діалоговому вікні параметри триангуляції (рис. 2.7), в даній магістерській роботі прийнято шаг триангуляції рівним 0,045 м, що значно покращує точність розрахунку;

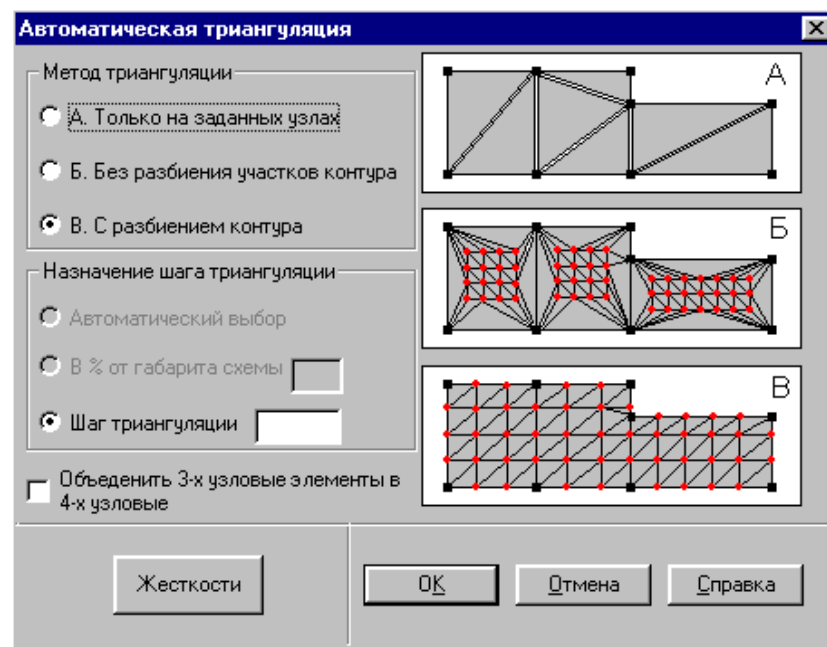




Рисунок 2.7 – Діалогове вікно **Автоматическая триангуляция**

5) після виходу з діалогового вікна натисненням кнопки **OK** виконується розбиття заданої області на скінченні елементи.

Особливості введення контуру:


- при введенні ділянки контуру можна не зупинятися на вузлах, які лежать на прямій, що сполучає опорні вузли. Вони будуть введені в контур автоматично;
- замикання контуру виконується подвійним клацанням миші після введення останнього вузла або вказівкою на перший вузол;
- не допускається наявність збіжних вузлів (вузли, що мають однакові координати) як опорних, так і проміжних;
- не допускається попадання всередину контуру збіжних вузлів;
- не допускається наявність усередині контуру вузлів, що лежать від контуру на відстані менше 0,15 заданих кроків триангуляції, оскільки це призведе до появи вироджених трикутників;
- внутрішні контури не повинні перетинати або торкатися зовнішнього контуру й один одного;
- не допускається наявність контурів, які лежать поза контуром, що обмежує область триангуляції.


Введений контур можна зберегти, натиснувши кнопку **Сохранение контура** . Якщо до моменту збереження задано декілька контурів, то всі вони зберігаються під одним ім'ям. Рекомендується зберігати кожен контур окремо. Для цього після введення і збереження контуру слід натиснути кнопку **Отказ** і лише після цього вводити новий контур. Перед виконанням триангуляції необхідно натисненням кнопки **Отказ** очистити схему від всіх контурів, потім послідовно викликати контури із списку, розташованого праворуч від кнопки збереження, і активізувати операцію **Генерация сетки конечных элементов** .

Перед виконанням триангуляції у вікні **Автоматическая триангуляция** (див. рис. 2.7) потрібно вибрати метод триангуляції. Відповідно до вибраного методу триангуляція може бути виконана: 1) тільки на заданих вузлах; 2) з розбиттям області триангуляції із заданим кроком уздовж координатних осей, але без введення додаткових вузлів на ділянках контуру, з розбиттям і контуру,

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і області триангуляції відповідно до заданого кроку. Якщо в діалоговому вікні **Автоматическая триангуляция** встановлена ознака об'єднання тривузлових елементів в чотиривузлові, то в процесі формування схеми таке об'єднання буде виконане для всіх допустимих пар трикутників.

Схема, створена в результаті триангуляції, фактично є самостійною підсхемою, і після завершення триангуляції її потрібно «встановити на місце», тобто приєднати до вузлів, на яких виконувалася триангуляція (кнопка  – **Установка сформированной схемы по месту**).

Якщо підсхему передбачається приєднувати до інших фрагментів схеми, її можна зберегти і як самостійну схему, скориставшись для цього кнопкою  **Запись результатов триангуляции**. При цьому схема повинна бути записана під новим ім'ям, відмінним від імені основної схеми.

На відміну від створення нової схеми, триангуляція області, яка належить вже існуючій розрахунковій схемі, виконується шляхом завдання контуру безпосередньо на початковій схемі або її фрагменті. Після завершення триангуляції одержана схема може бути збережена як самостійна схема (кнопка **Запись результатов триангуляции**), встановлена по місцю в схему (кнопка **Установка сформированной схемы по месту**) або виконані обидві ці операції.

Остаточна фіксація результатів триангуляції виконується тільки після виходу з режиму триангуляції (відтиснута кнопка **Формирование треугольной сетки конечных элементов на плоскости**). У цьому випадку на екран виводиться результуюча розрахункова схема. Протягом одного «сеансу» можна виконати триангуляцію тільки однієї області, потім закрити режим триангуляції. Для триангуляції іншої області слід знову активізувати режим триангуляції.

На рис. 2.8 наведена модель земляного полотна, яка створена у комплексі SCAD за допомогою автоматичної триангуляції. Загальна кількість вузлів схеми – 23383 шт. (біля 70 тисяч ступенів волі, задача вважається великорозмірною), кількість скінченних елементів – 23 157 шт. СЕ у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення. Розміри моделі: довжина – 12,6 м, висота – 5,4 м (з яких

									011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

висота земляного полотна – 4 м, основа – 1 м, баластний шар щебеню – 0,4 м).

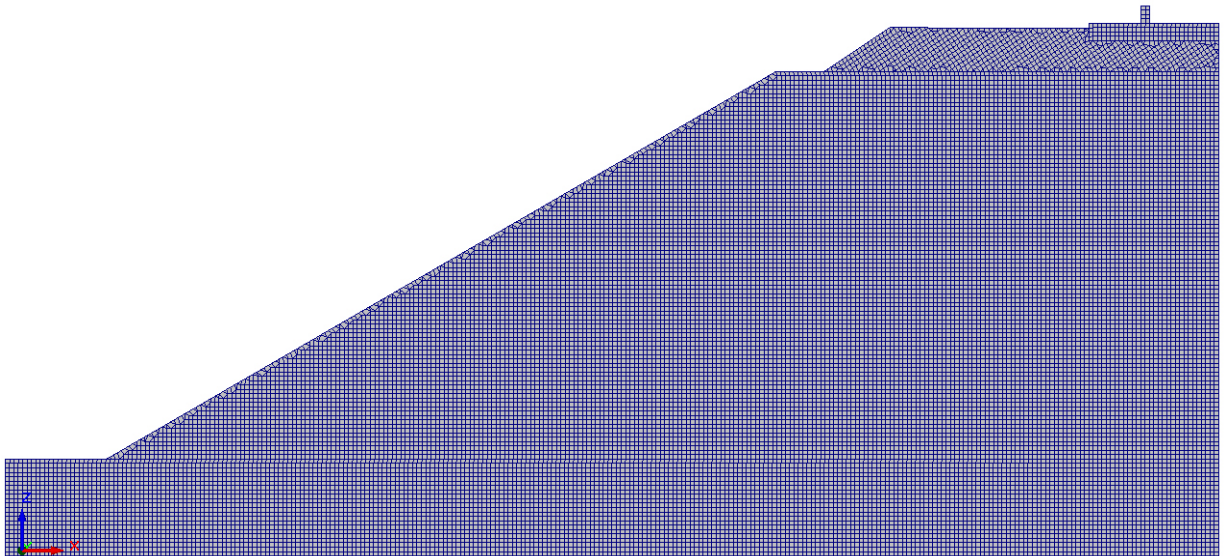


Рисунок 2.8 – Плоска модель непідсиленого земляного полотна (Варіант 0)

Розміри моделі прив'язані до реальної ділянки залізниці, яка є одношляховою, але розглядається як перспективна двошляхова. Ширина основного майданчика і баластний шар збільшених розмірів дозволяє реконструювання одношляхової ділянки в двошляхову, але за умови підсилення земляного полотна, наукове обґрунтування параметрів якого є задачею магістерської роботи.

Після формування геометрії розрахункової схеми за допомогою описаних вище функцій часто виникає необхідність її коректування. Для цього в комплексі передбачені певні функції для роботи з вузлами й елементами, які включають різні операції уведення, видалення, відновлення, дублювання, перенесення тощо. Усі ці функції зосереджені в розділі інструментальної панелі **Узлы и Элементы** (рис. 2.9).

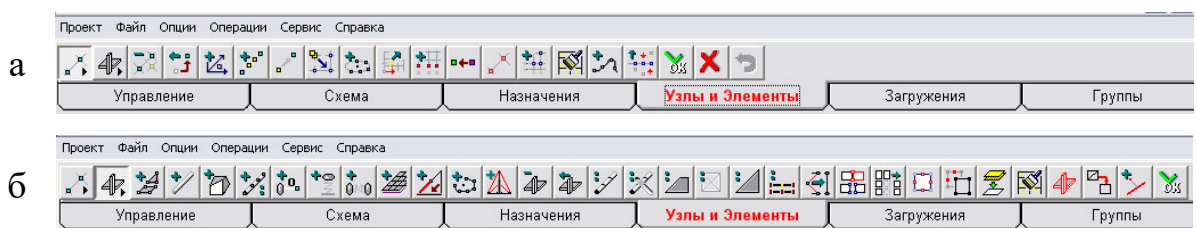




Рисунок 2.9. Розділ **Узлы и Элементы** інструментальної панелі препроцесора:

а – розділ **Узлы** ; б – розділ **Элементы** 

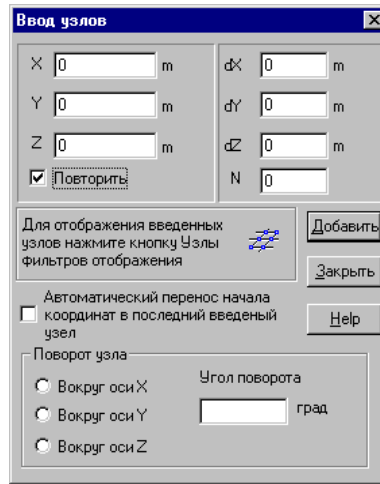



Рисунок 2.10 – Диалогове вікно **Ввод узлов**

 Функція **перенесення вузлів** включає дві операції: перенесення на заданий вектор і перенесення в задану точку. Вибір операції і установка параметрів виконуються в діалоговому вікні **Перенос узлов** (рис. 2.11), яке з'являється після активізації функції.

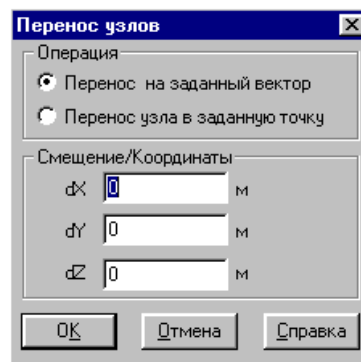



Рисунок 2.11 – Диалогове вікно **Перенос узлов**

 **Об'єднання збіжних вузлів.** Після натиснення кнопки **Объединение совпадающих узлов** з кожної групи вузлів зі збіжними координатами в схемі залишиться тільки один вузол, а інші будуть видалені. У елементах, які примикали до видалених вузлів, номери вузлів заміняться на ті, що залишилися в схемі.

Для подальшого обґрунтування параметрів НДС підсиленого земляного полотна обрано три варіанти його підсилення вертикальними елементами – ґрунтоцементними палями діаметром 0,3 м, створеними на основі

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.MP.2020.000				

бурозмішувальної технології (рис. 2.12).

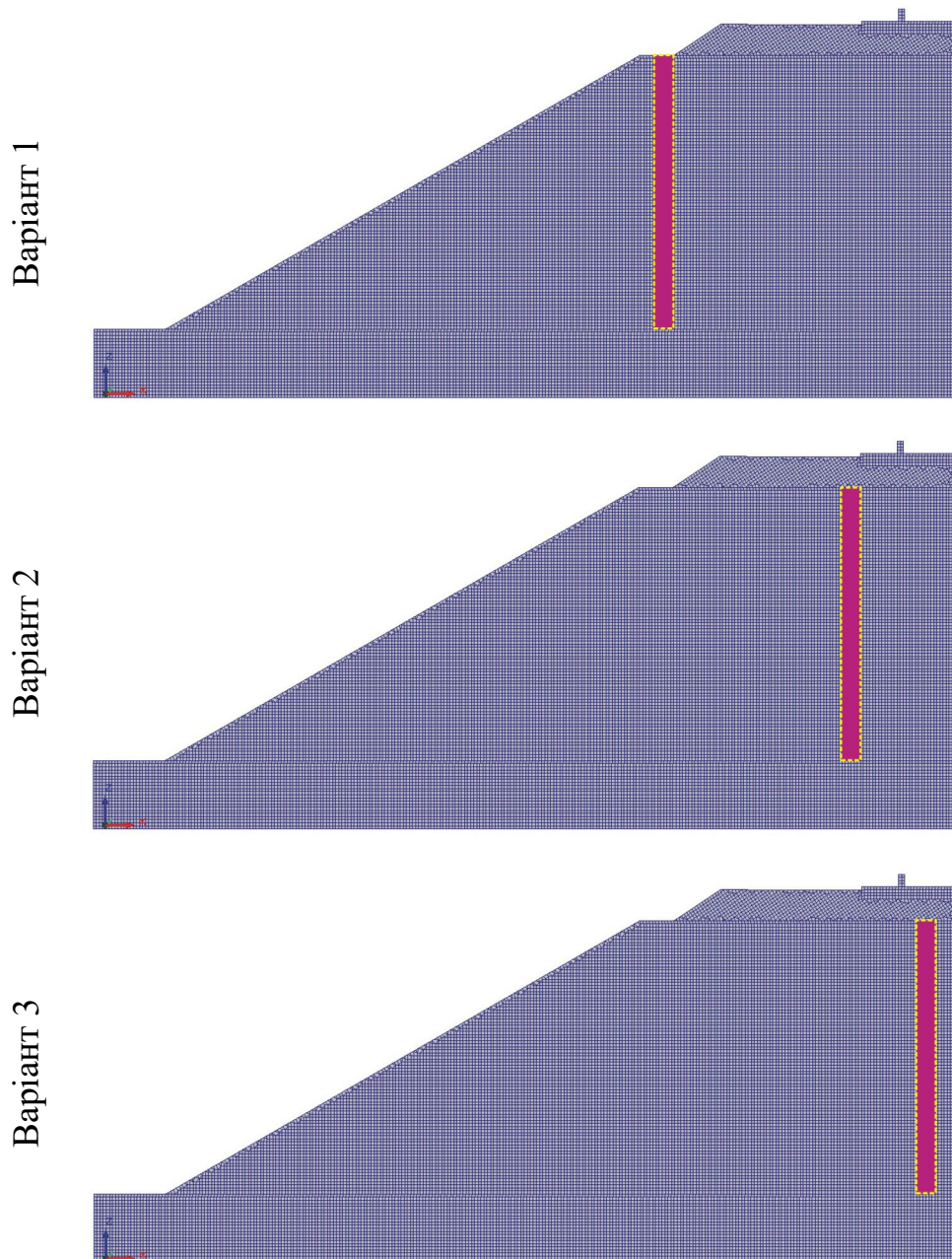


Рисунок 2.12 – Варіанти підсилення земляного полотна:

- 1) палі біля баластної призми (Варіант 1);
- 2) палі біля шпали (Варіант 2); 3) палі біля рейки (Варіант 3)


Після заключного формування геометрії розрахункової схеми та її коректування СЕ-моделі слід задати властивості, оскільки СЕ не має ніяких властивостей, окрім геометричних. Для визначення властивостей вузлів та елементів слід скористатися панеллю **Назначения** (рис. 2.13).


					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		




Рисунок 2.13 – Инструментальна панель Назначения

Для виконання функцій призначення використовуються основні кнопки:

 – призначення деформаційних характеристик пластинчастим елементам;

 – призначення зв'язків у вузлах.

 **Уведення деформаційних характеристик пластинчастим елементам** виконується в діалоговому вікні **Жесткости пластинчатых элементов**. Характеристики жорсткості цього типу елементів включають чотири параметри – товщину пластини (приймається рівною 1 м), модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона ν і об'ємну вагу γ .

Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими грунтами земляного полотна. На рис. 2.14. показана карта деформаційних характеристик, які надані СЕ-моделям:

Жорсткість 1: основа земляного полотна – суглинок, питома вага $\gamma=1,9$ т/м³, модуль пружності $E=25\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,3$;

Жорсткість 2: послаблене земляне полотно – суглинок, питома вага $\gamma=1,9$ т/м³, модуль пружності $E=20\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,3$;

Жорсткість 3: баластна призма – щебінь, питома вага $\gamma=2,2$ т/м³, модуль пружності $E=100\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$;

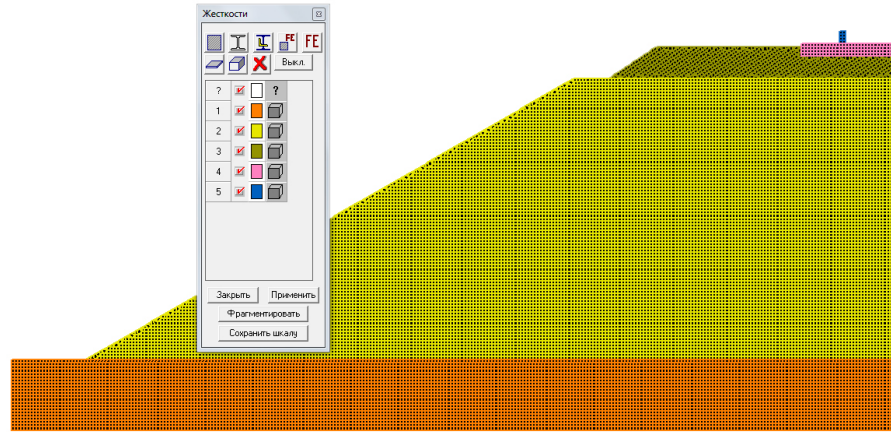
Жорсткість 4: шпала – залізобетон, питома вага $\gamma=2,45$ т/м³, модуль пружності $E=35\ 000\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$;

Жорсткість 5: рейка – сталь, питома вага $\gamma=7,7$ т/м³, модуль пружності $E=21\ 000\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$;

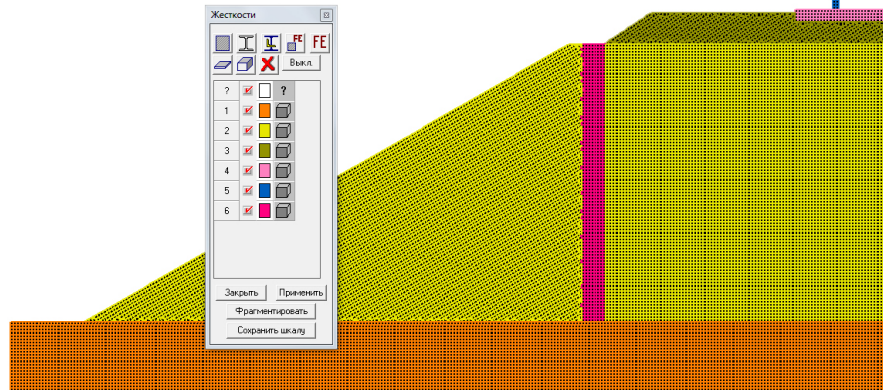
Жорсткість 6: матеріал елемента армування – паля, що створена за допомогою бурозмішувальної технології, питома вага $\gamma=2,1$ т/м³, модуль пружності $E=200\ 000$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$.

					011.196103.MP.2020.000		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

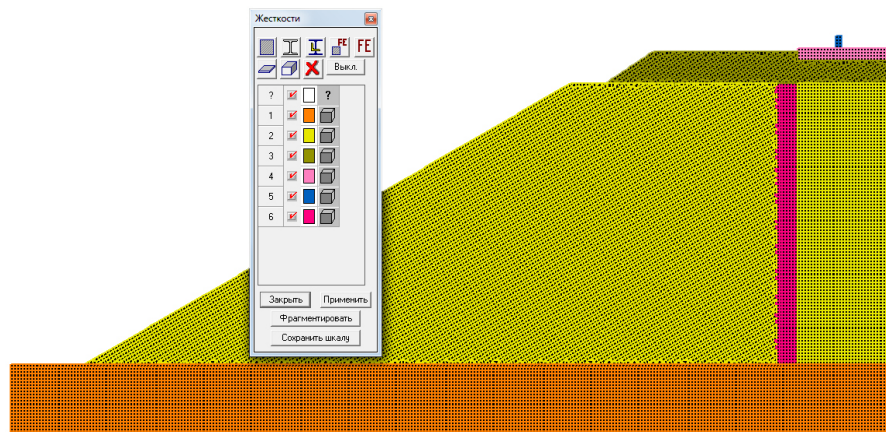
а)



б)



в)



г)

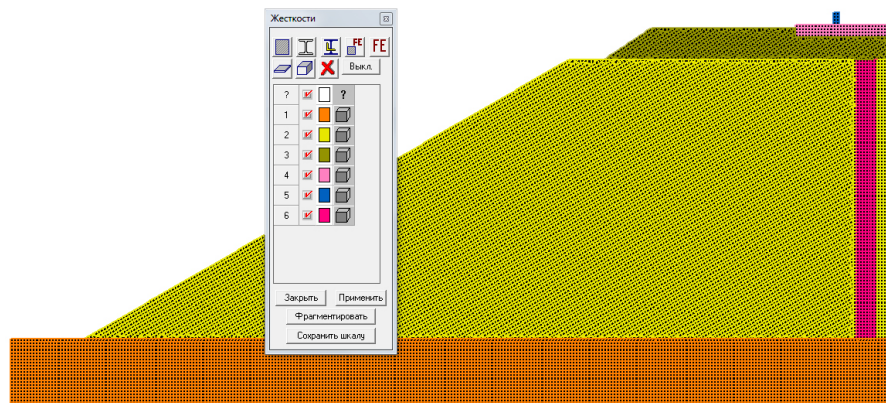


Рисунок 2.14 – Карта розподілення деформаційних характеристик в СЕ-моделі

а) Варіант 0; б) Варіант 1; в) Варіант 2; г) Варіант 3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

011.196103.MP.2020.000

Арк.



Зв'язки у вузлах розрахункової схеми призначаються в діалоговому вікні **Связи** (рис. 2.15), яке викликається натисненням відповідної кнопки в розділі **Назначения** інструментальної панелі. Для призначення зв'язків у вузлі слід вибрати за допомогою відповідних кнопок напрями степенів вільності, за якими накладаються зв'язки, натиснути кнопку **ОК** в діалоговому вікні, вибрати на схемі вузли й виконати операцію натисненням кнопки **ОК** в розділі **Назначения**.

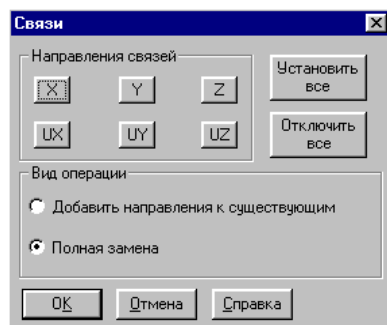


Рисунок 2.15 – Діалогове вікно Задание связей в узле

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

Після задання СЕ деформаційних властивостей та граничних умов слід прикласти до схеми навантаження. Це слід зробити, скориставшись інструментальною панеллю **Загружения** (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Інструментальна панель Загружения

Навантаження, які діють на конструкцію земляного полотна, що розраховується, можуть бути задані у вигляді власної ваги (дія гравітації) та вузлових сил (зосереджена дія рухомого складу). Завантаження може включати

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

011.196103.MP.2020.000

комбінацію навантажень різних типів і характеризується номером та ім'ям.

У розділ **Загруження** включені такі операції:



– задання вузлових навантажень;



– запис завантаження;



– видалення навантажень.



Задання напрямку й значень вузлових навантажень виконується в діалоговому вікні **Ввод узловых нагрузок** (рис. 2.17), яке з'являється після натиснення відповідної кнопки в розділі **Загруження** інструментальної панелі.

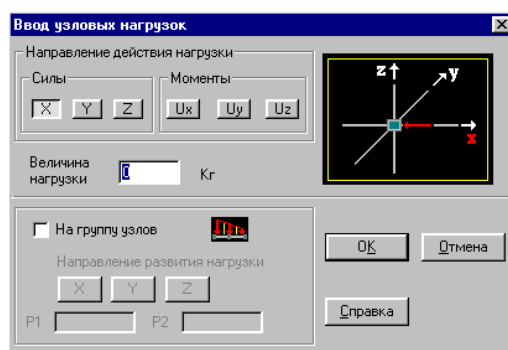



Рисунок 2.17 – Діалогове вікно Ввод узловых нагрузок

Залежно від вибраного напрямку навантаження в діалоговому вікні демонструється піктограма, що показує додатний напрям дії навантаження.

Загальний порядок задання навантажень для статичних завантажень: за допомогою кнопок інструментальної панелі вибрати вид навантаження; у діалоговому вікні призначити вигляд, напрям і значення навантаження (див. рис. 2.17); вибрати вузли або елементи, на які встановлюються навантаження; натиснути кнопку **ОК** в розділі **Загруження**; повторити описані операції і для інших навантажень, що входять в поточне завантаження; після призначення всіх навантажень поточного завантаження натиснути на кнопку **Запись загрузки** ; у діалоговому вікні ввести ім'я завантаження й натиснути кнопку **ОК** (номер завантаження буде присвоєний автоматично, про що повідомляється в інформаційному вікні); натиснути кнопку **Снять все**

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Для видалення завантаження необхідно вибрати його в списку завантажень і натиснути кнопку **ОК** в діалоговому вікні.

Виконання розрахунку можливе тільки за умови, коли початкові дані поточного проекту містять обов'язкову інформацію, тобто геометрію розрахункової схеми, опис деформаційних характеристик всіх елементів і завантаження. Оскільки повний контроль початкових даних виконується на першому кроці розрахунку, то за наявності цієї інформації процесор стартує. Активізація розрахунку виконується з відповідного розділу **Дерево проекту**. Після чого з'являється діалогове вікно **Параметры расчета** (рис. 2.20), у якому слід вибрати режим роботи процесора (**Полный расчет** або **Продолжение расчета**) і натиснути кнопку **Выполнить расчет**.

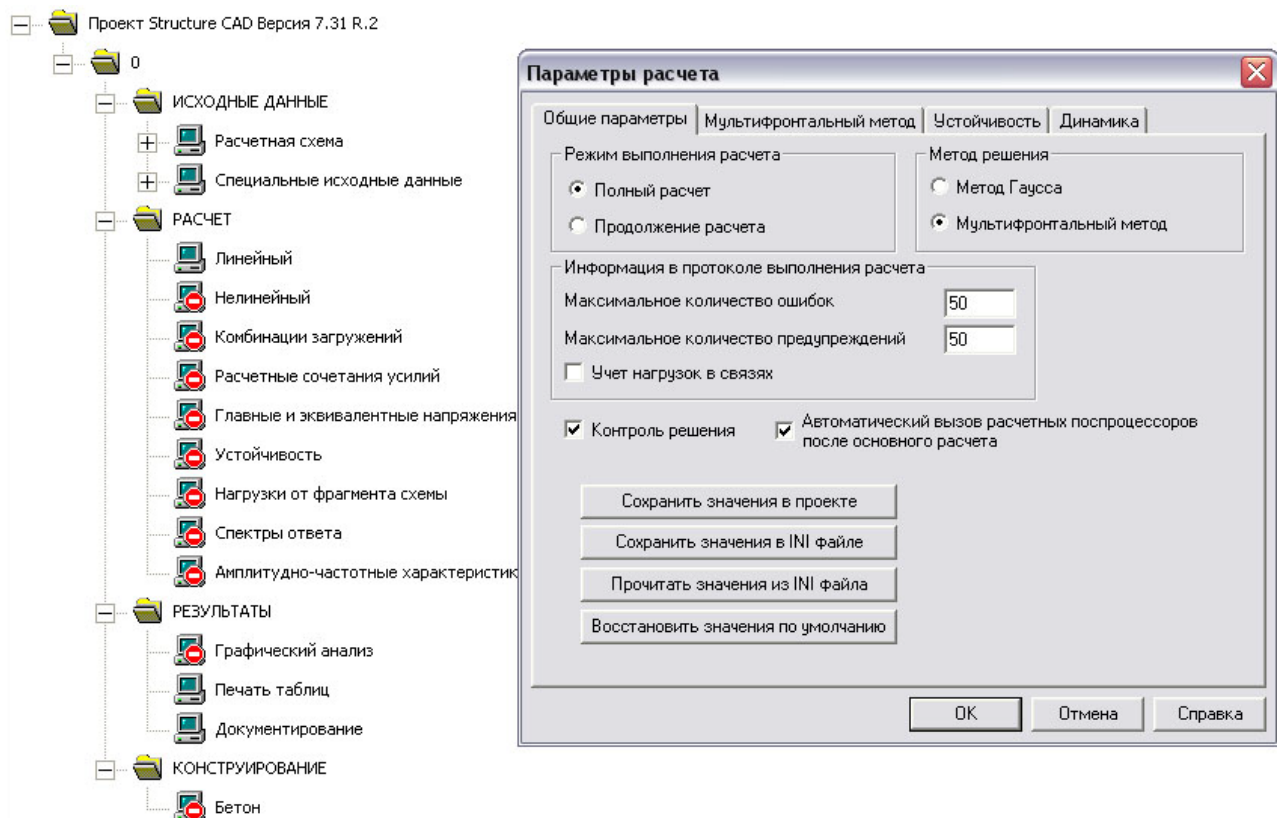


Рисунок 2.20 – Діалогове вікно Параметры расчета

Для підтвердження виконання розрахунку з'являється діалог підтвердження (рис. 2.21).

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

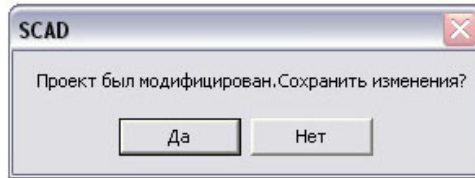


Рисунок 2.21 – Діалогове вікно підтвердження розрахунку

Після того як кнопка **Да** натиснута, розпочинається розрахунок.

Аналіз результатів розрахунку виконується в тому самому середовищі, що й підготовка початкових даних. При цьому змінюється тільки інструментальна панель і додаються нові фільтри відображення. Функції цього режиму дозволяють відобразити на екрані напружено-деформований стан об'ємних елементів та результати роботи різних постпроцесорів (рис. 2.22).

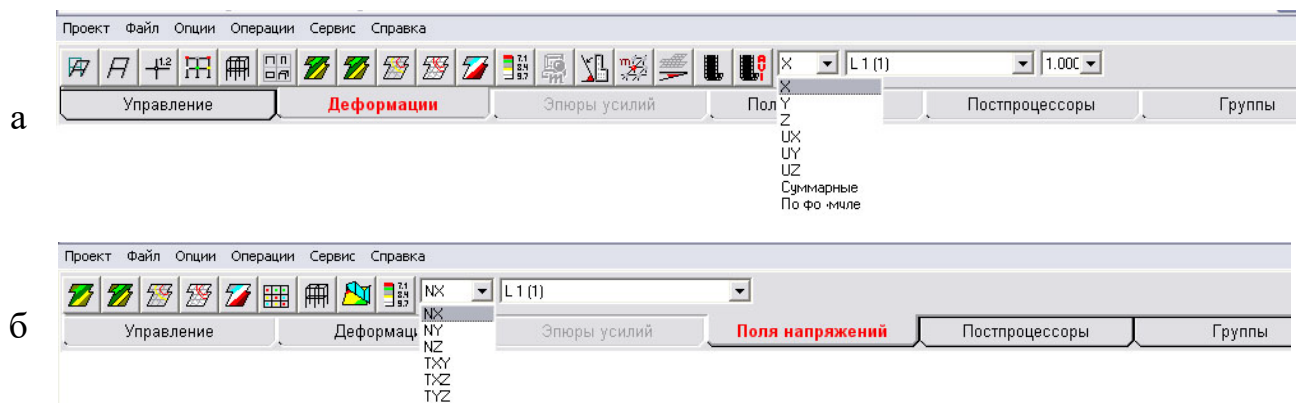


Рисунок 2.22 – Інструментальні панелі постпроцесора:





а – розділ **Деформации**; б – розділ **Напряжения**

При графічному аналізі результатів рекомендується дотримуватися послідовності виконання операцій: 1) встановити в списку завантаження його номер; 2) вибрати в списку параметрів вид аналізованої інформації; 3) натиснути кнопку вибору форми подання інформації.





Для об'ємних елементів переміщення й силові фактори можуть виводитися у вигляді **ізоліній** або **ізополів**. Крім того, силові фактори можуть відображатися колірними маркерами в центрах елементів.

На інструментальній панелі **Деформации** передбачене виконання таких функцій відображення результатів (рис. 2.22, а):

									011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

-  – графічний аналіз ізополів переміщень;
-  – графічний аналіз ізополів та ізоліній переміщень;
-  – відображення початкового стану схеми;
-  – формування відеокліпів переміщень для завантажень.

На інструментальній панелі **Напряження** передбачене виконання таких функцій відображення результатів (рис. 2.22, б):

-  – графічний аналіз ізополів напружень;
-  – графічний аналіз ізополів та ізоліній напружень;
-  – установка параметрів шкали кольору;
-  – відображення початкового стану схеми.

Для більш детального аналізу складних схем земляного полотна слід розміщати їх певним характерним чином, що можна зробити за допомогою інструментальної панелі **Візуалізація** (рис. 2.23). За допомогою цих функцій виконуються операції повороту зображення схеми навколо заданих осей, проєктування зображення на площині прямокутної системи координат, а також різні операції з виділення фрагмента схеми.



Рисунок 2.23 – Інструментальна панель Візуалізація

						011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			





Поворот зображення розрахункової схеми навколо заданої осі виконується натисненням відповідних кнопок інструментальної панелі.



Ці операції дозволяють спроектувати зображення схеми на одну з площин загальної системи координат. Вибір площини проєктування виконується за допомогою відповідних кнопок інструментальної панелі. Щоб повернути зображення схеми в початкове положення, треба натиснути кнопку



Для роботи з довільним фрагментом розрахункової схеми слід скористатися функцією фрагментації за допомогою рамки. Рамка може бути прямокутної або довільної форми. Після натиснення кнопки фрагментації рамкою автоматично встановлюється курсор прямокутної рамки. Зміна вигляду рамки виконується в діалоговому вікні **Выбор узлов и элементов**. Для фрагментації прямокутною рамкою її слід встановити так, щоб усі вузли й елементи, які повинні потрапити у фрагмент, знаходилися усередині рамки. Рамка довільної форми задається послідовною фіксацією лівою кнопкою миші точок перелому області відсікання фрагмента. Закриття області, тобто з'єднання першої і останньої точки, виконується автоматично після подвійного клацання лівою кнопкою миші. Після установки рамки всі області відсікання, що потрапили всередину, елементи і вузли будуть виділені зеленим кольором. Якщо фрагмент вибраний правильно, то підтвердження виконується натисненням зеленої кнопки . У разі помилки слід натиснути червону кнопку  – відмову від фрагментації.



Функція **Крупный план** дозволяє збільшити зображення розрахункової схеми до будь-якого розміру. На відміну від функцій фрагментації, де на екран виводиться тільки виділена частина схеми, ця функція дає доступ до всієї схеми або фрагмента. Масштаб зображення схеми змінюється таким чином, що її виділена частина займає все поле екрана, а

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	011.196103.MP.2020.000				

доступ до іншої, невидимої частини здійснюється через смуги прокрутки, розташовані в правій і нижній частинах екрана.

Управління відображенням інформації на розрахунковій схемі виконується за допомогою фільтрів. Вони дозволяють встановити не тільки вид інформації, що відображається, але і правила відображення. Управління фільтрами зосереджене в переміщуваній інструментальній панелі **Фільтри отображення** (рис. 2.24).



Рисунок 2.24 – Інструментальна панель Фільтри отображення



Ці кнопки фільтрів призначені для включення або відключення відображення елементів певного вигляду – стрижнів, пластин, об'ємних або спеціальних. У початковому стані всі чотири кнопки активні, тобто на схемі будуть показані всі види елементів.

Цей фільтр дозволяє одержати повну інформацію про координати, зв'язки, навантаження, а цей фільтр – інформацію про тип СЕ, кількість перерізів видачі зусиль, жорсткості, прикладені навантаження, кути орієнтації місцевих осей інерції, шарніри, жорсткі вставки.

Ці кнопки фільтрів призначені для включення або відключення відображення номерів елементів та вузлів, а також типу елементів .



Ця кнопка фільтрів призначена для включення або відключення

Розділ 3. Математичне моделювання варіантів підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології

3.1 Чисельний аналіз варіантів підсилення елементами, створеними за допомогою бурозмішувальної технології

Розглянемо чотири варіанти земляного полотна: один (Варіант 0) – без підсилення (див. рис. 2.8), три (Варіант 1, 2 і 3) – з підсиленням вертикальними елементами, створеними за бурозмішувальною технологією, що відрізняються своїм розташуванням відповідно земляного полотна (див. рис. 2.12).

Для кількісного аналізу отриманих параметрів напружено-деформованого стану застосуємо схему (рис. 3.1), причому точки 1-4, що позначені на схемі, відповідають компонентам переміщень, а точки 4-6 – компонентам напружень.

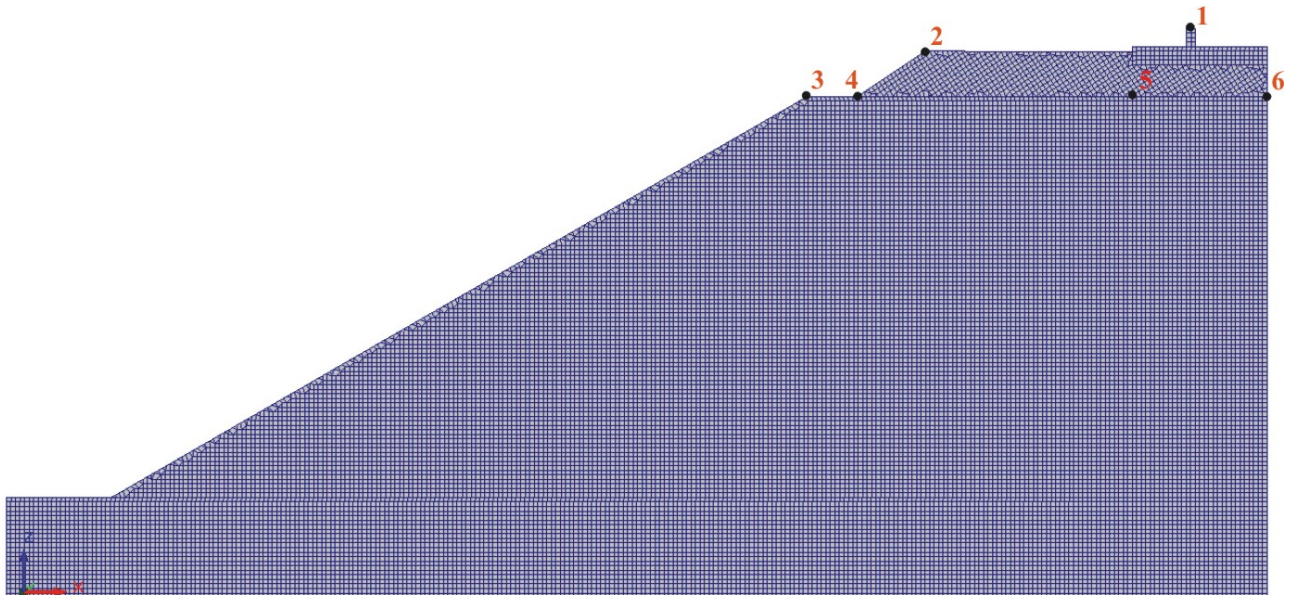
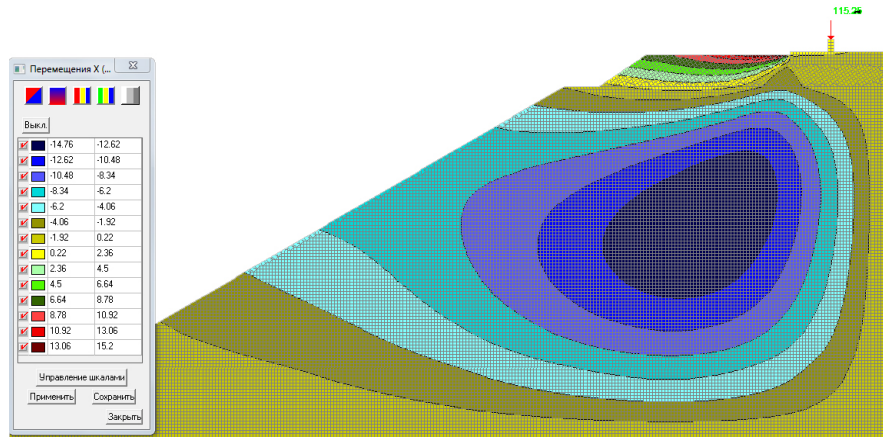


Рисунок 3.1 – Точки, в яких замірюються значення параметрів напружено-деформованого стану

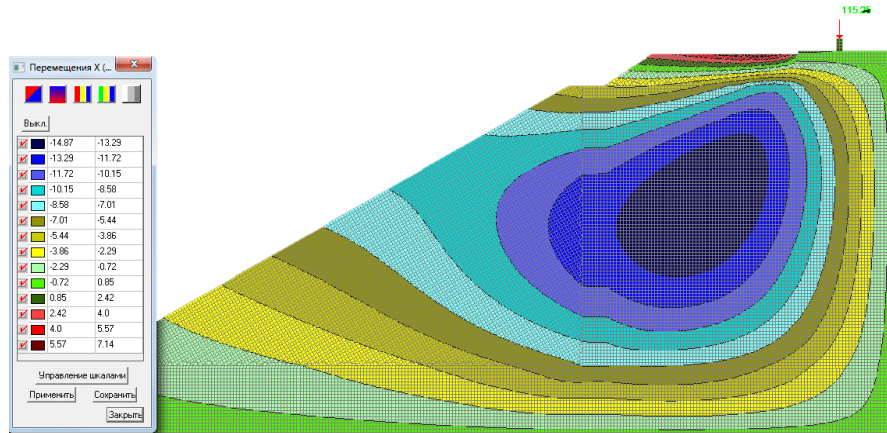
На рис. 3.2-3.5 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїзним навантаженням.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

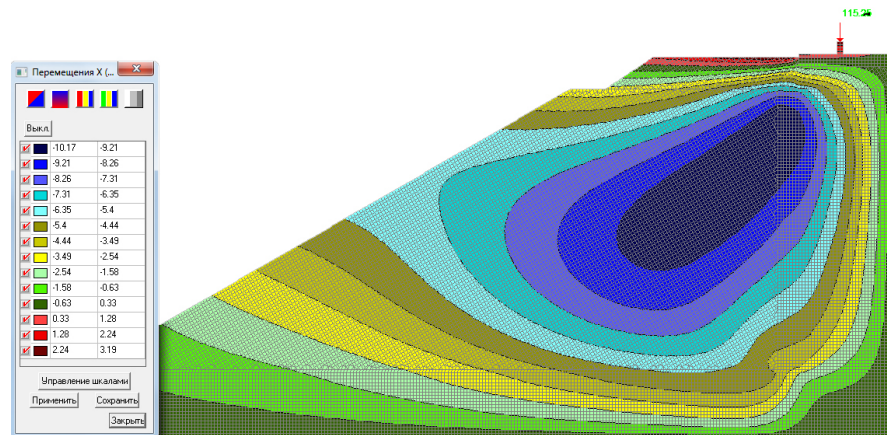
Варіант 0



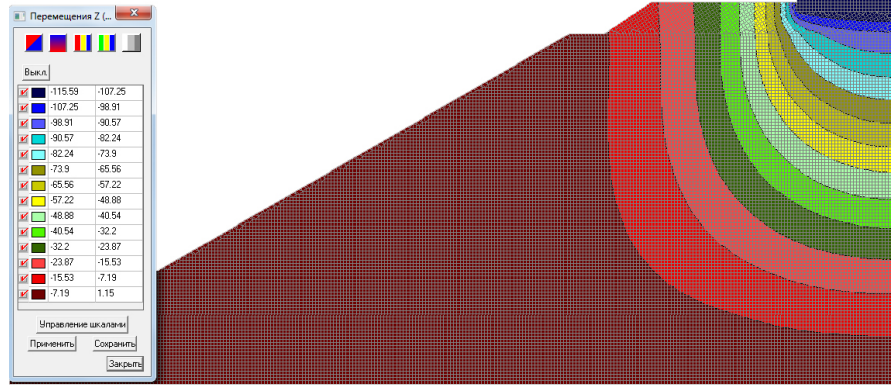
Варіант 1



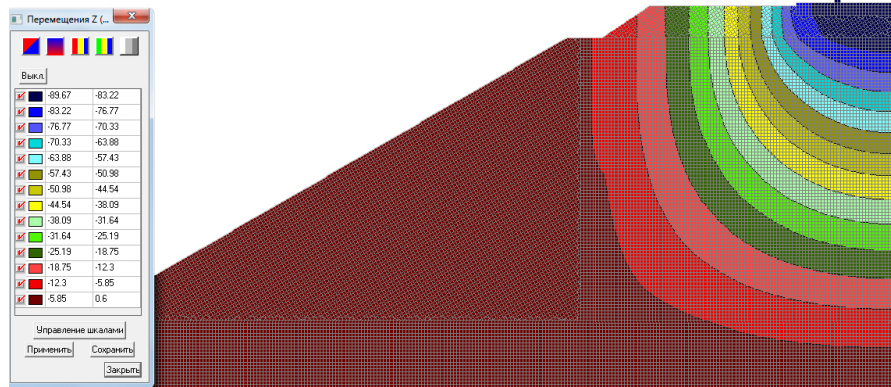
Варіант 2



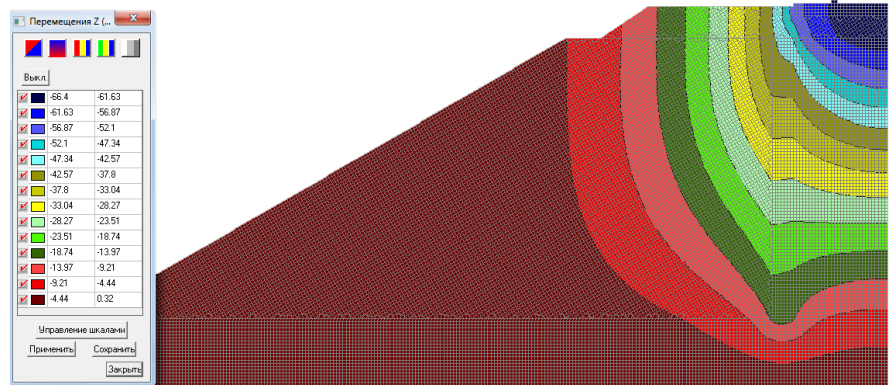
Варіант 0



Варіант 1



Варіант 2



Варіант 3

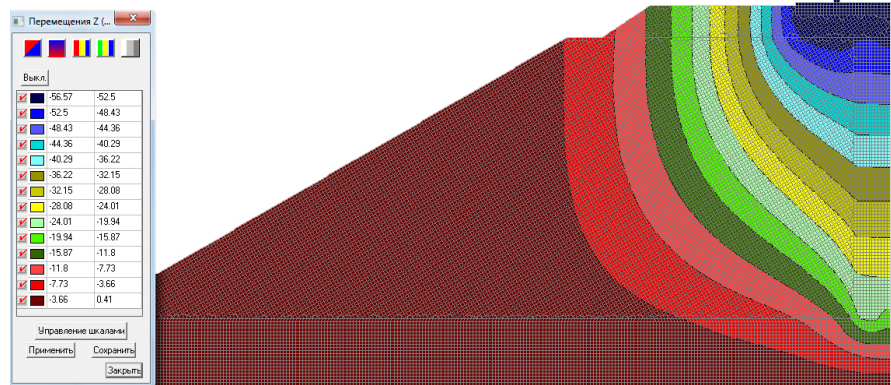


Рисунок 3.3 – Ізолінії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) в моделі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Основною ідеєю математичного моделювання та чисельного аналізу було порівняння Варіантів 1-3 з непідсиленним земляним полотном (Варіант 0). Аналіз рис. 3.2 виявляє досить значні якісні зміни у розподілу горизонтальних напружень. Ядро від'ємних переміщень змінює свою форму в залежності від розташування вертикальних елементів підсилення, що створені бурозмішувальним методом. Особливо це явно видно із зміни ізополів, що викривилися у Варіантах 2 та 3. Така картина пояснюється тим, що жорсткість ґрунту послабленого земляного полотна (суглинок, модуль пружності $E=20\ 000$) в десять разів менше жорсткості матеріалу елемента армування (ґрунтоцемент, модуль пружності $E=200\ 000$ кПа). Відношення жорсткостей змінює однорідну картину переміщень, тіло елемента підсилення зменшує їх значення. На рис. 3.6 наведено діаграму зміни горизонтальних переміщень у точках схеми (див. рис. 3.1). Найбільш важливою точкою є точка 1, що знаходиться на рейці і максимально повно характеризує вплив розташування елементів підсилення.

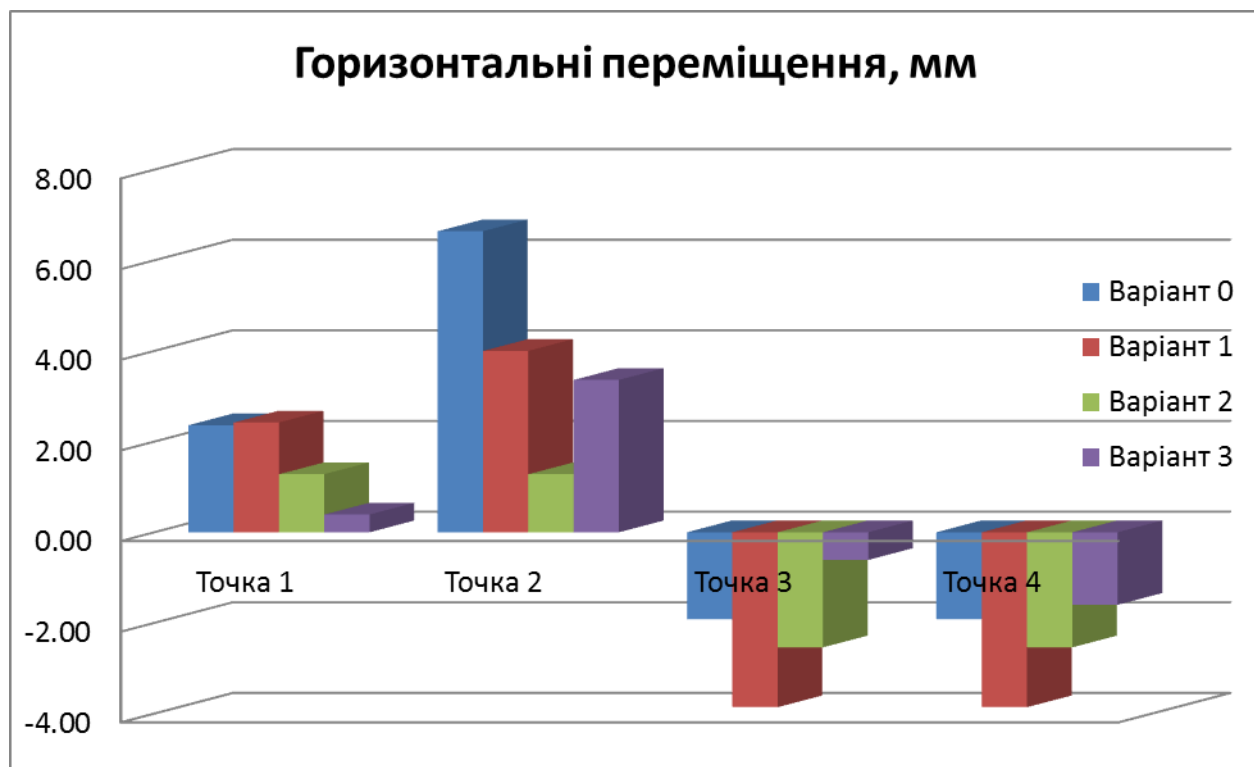


Рисунок 3.6 – Діаграма розподілу горизонтальних переміщень (мм)
в точках моделі

Варіантами підсилення вертикальними елементами, створеними за бурозмішувальною технологією, що максимально знижує рівень горизонтальних переміщень, є Варіанти 2 (палі біля шпали) Варіант 3 (палі біля рейки) (див. рис. 3.3). Так, наприклад, в точці 1 горизонтальні переміщення у Варіанті 3 в 6,05 разів менше, ніж в Варіанті 0 (непідсилене земляне полотно), а в точці 2 у Варіанті 2 менше в 5,19 разів. Однак, слід відмітити, що у Варіанті 2 у точках 3 та 4 значення горизонтальних переміщень навіть збільшилися, сягнувши значення -2,54 мм на відміну від -1,92 у Варіанті 0. Це пояснюється перерозподілом жорсткостей та неоднорідністю напружено-деформованого стану всієї системи. Проте, значення переміщень незначні, тому заявляти про неефективність Варіанту 3 без проведення подальшого аналізу зарано.

На рис. 3.7 наведено діаграму зміни вертикальних переміщень, яка є найбільш представницькою, оскільки уведення елементів підсилення, створених за бурозмішувальною технологією, принцип яких подібний до паль, логічним чином найбільш впливає на вертикальну компоненту переміщень.

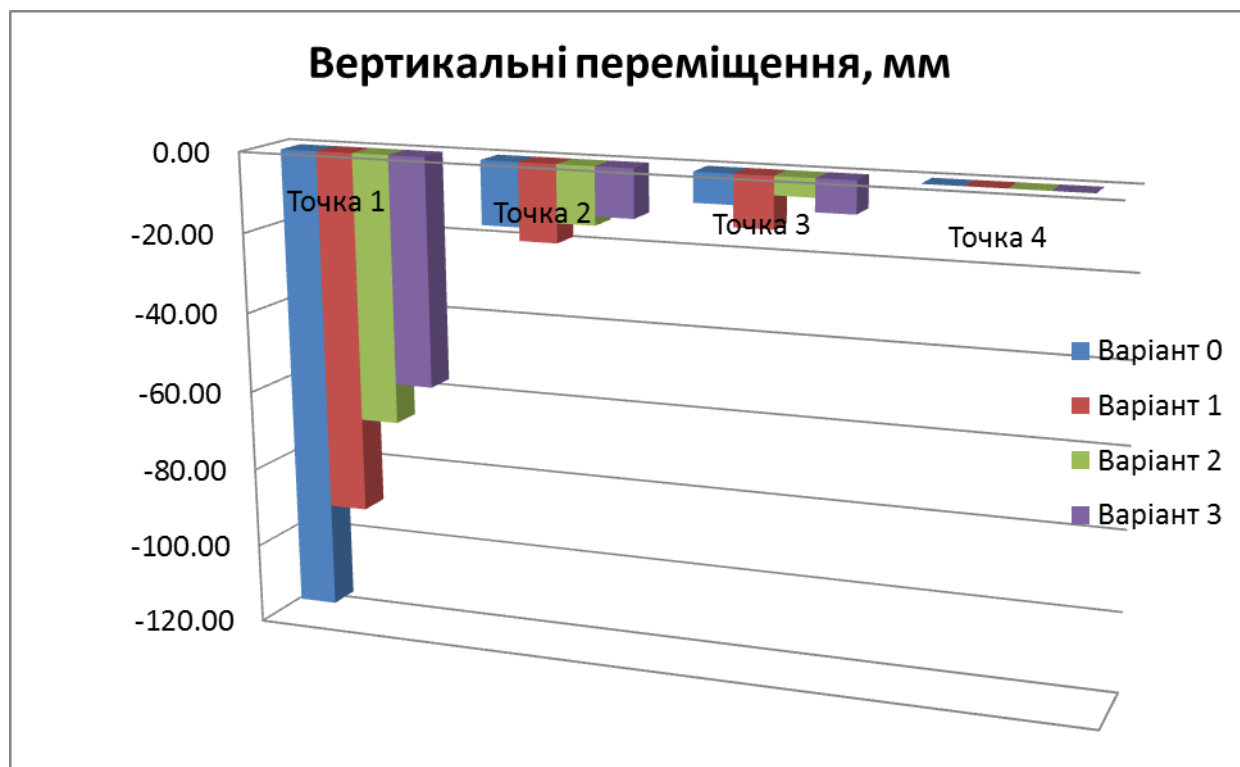


Рисунок 3.7 – Діаграма розподілу вертикальних переміщень (мм) в точках моделі

Аналіз діаграми надає змоги зробити висновок, що усі три варіанти значно зменшують рівень переміщень. Якщо порівнювати вертикальні переміщення Варіанту 0 (непідсилене земляне полотно) із трьома варіантами підсилення, то слід відмітити, що вони в точці 1 (головка рейки) зменшуються у 1,29 рази (Варіант 1), 1,74 рази (Варіант 2) та 2,04 рази (Варіант 3). Варіанти 2 і 3 найбільше зменшують рівень вертикальних переміщень у трьох останніх точках їх вимірювання: 1,11...3,59 рази у Варіанті 2 та 1,32...2,8 у Варіанті 3. Це пояснюється тим, що занурення вертикальних елементів, що призводить деформований стан до неоднорідного, найбільш впливає в зоні максимального розвитку деформацій – «ядра», що утворюється в області рейко-шпальної решітки. Тому Варіант 1 (пали біля баластної призми) є менш ефективним в зменшенні вертикальних переміщень тому, що елементи підсилення більшої жорсткості знаходяться поза зоною активного деформування. Незначне збільшення вертикальних переміщень в точці 3 (брівка насипу, див. рис. 3.1) у Варіанті 3 (-7,73 мм на відміну від -7,19 у Варіанті 0) не свідчить про те, що вказаний варіант підсилення є неефективним, оскільки точка лежить поза зоною активного деформування, а значення збільшення не є критичним.

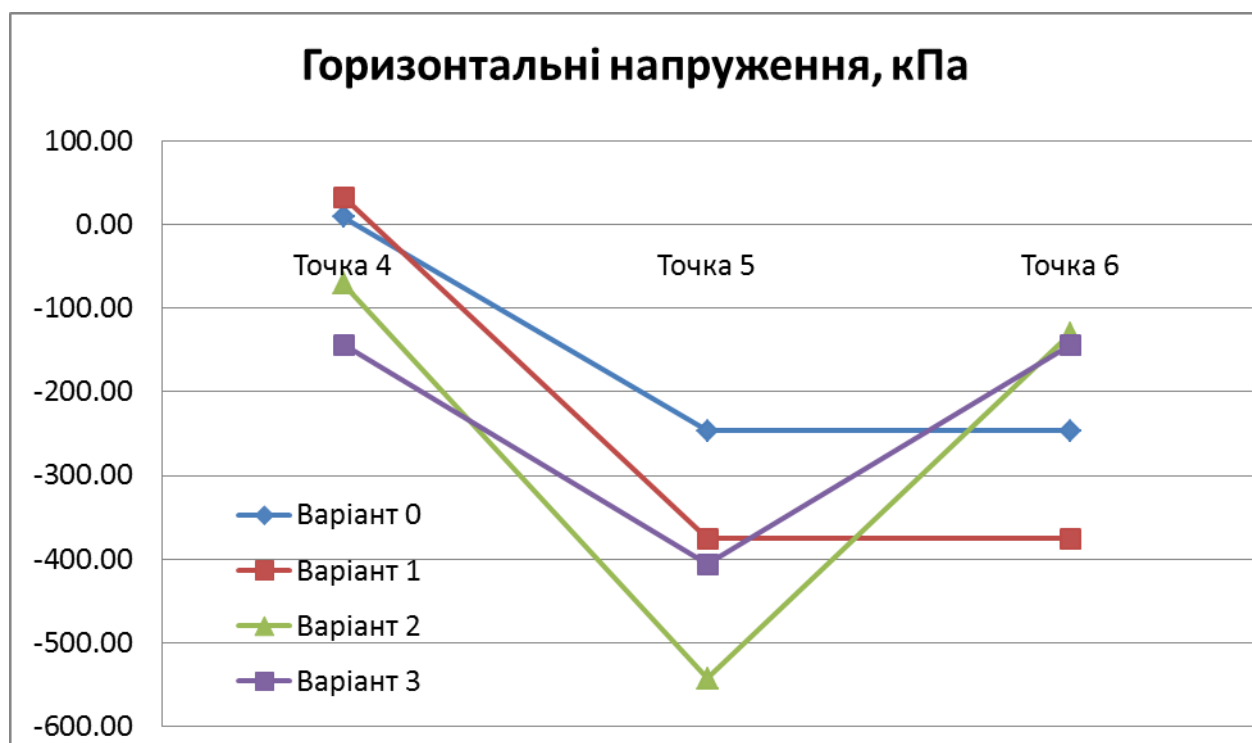


Рисунок 3.8 – Графік розподілу горизонтальних напружень (кПа)
в точках моделі

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

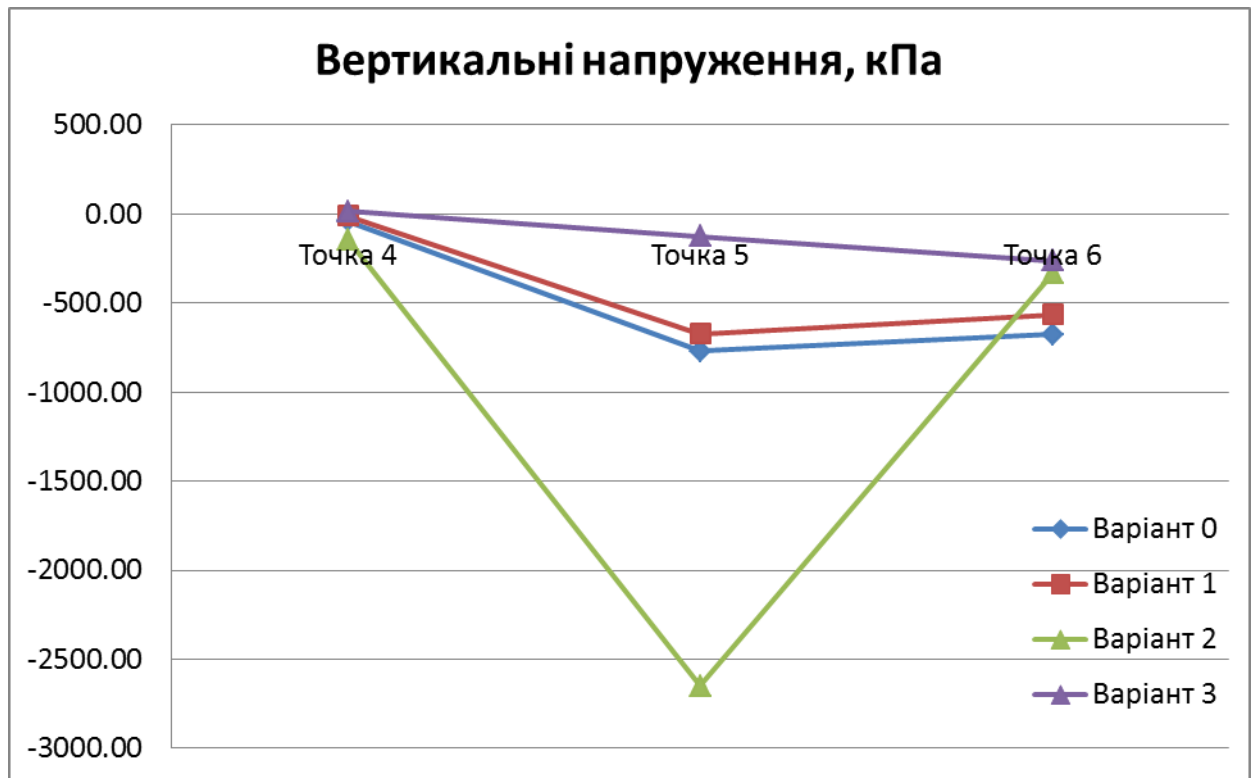


Рисунок 3.9 – Графік розподілу вертикальних напружень (кПа)
в точках моделі

Остаточний висновок про ефективність впливу вертикальних елементів підсилення, створених за бурозмішувальною технологією, можна зробити після аналізу напруженого стану (рис. 3.4-3.5). Проведемо його для двох компонент – горизонтальної та вертикальної, а результати для більшої наочності наведемо у вигляді графіків розподілу напружень в точках моделі (рис. 3.8 та 3.9).

Аналіз цих графіків дає змогу зробити висновок, що у Варіанті 2 в точці 5 (проекція обрізу шпали на основний майданчик земляного полотна, див. рис. 2.1) існує значний концентратор горизонтальних напружень (2,2 рази більше, ніж у Варіанті 0, тобто непідсиленому земляному полотні). Але, враховуючи значну неоднорідність напружено-деформованого стану, викликану зануренням більш жорстких на відміну від ґрунту земляного полотна елементів, таке перенапруження в точці 5 відбувається у всіх варіантах підсилення: у Варіанті 1 – 1,52 рази та у Варіанті 3 – 1,65 рази більше, ніж у Варіанті 0. Але в точці 6 (точка на осі симетрії земляного полотна, див. рис. 2.1) таке перенапруження є

лише у Варіанті 1, а Варіанти 2 і 3 з боку аналізу горизонтальних переміщень є майже схожими.

Однак, аналізуючи вертикальні напруження, слід відмітити значний стрибок у $-2648,62$ кПа в точці 5 у Варіанті 2, що пояснюється наявністю жорсткого тіла (елемент підсилення) в цій області. Активний розподіл вертикальних напружень від рейко-шпальної решітки стикається із елементом підсилення, і виникає перенапруження, яке не спостерігається у Варіантах 1 та 3. Слід відмітити, що вплив Варіанту 1 мінімальний, що свідчить розташування лінії рядом із лінією Варіанту 0 (див. рис. 3.9), зменшення ж напружень в точці 5 у Варіанті 3 сягає 6,19 разів.

Таким чином, основним висновком після аналізу НДС варіантів є те, що варіантом підсилення земляного полотна, який більш позитивно впливає на деформований стан, зменшуючи вертикальні переміщення та покращуючи напружений стан, значення якого дає змогу свідчити про нормальну експлуатацію земляного полотна, є Варіант 3, тобто конструкція паль, створених за допомогою бурозмішувальної технології, розташованих біля рейки.

3.2 Вплив варіації геометричних параметрів елементів підсилення

Після проведеного математичного моделювання та аналізу його результатів, з'ясовано, що Варіант 3 є таким, що найбільш ефективно зменшує переміщення та напруження. Для того, щоб більш повно оцінити його вплив на напружено-деформований стан земляного полотна, досліджено вплив варіації геометричних параметрів елементів підсилення, створених за допомогою бурозмішувальної технології, а саме довжини. В роботі не з'ясовується вплив ще двох важливих параметрів елементів підсилення, створених за допомогою бурозмішувальної технології, а саме діаметру та модулю деформації ґрунтоцементу, який залежить від обсягу цементу. Хоча ці важливі параметри і відмічаються, але їх вплив не досліджується, оскільки це не було завданням магістерської роботи.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 3.10 наведено карти розподілення деформаційних характеристик, на яких відмічено варіацію довжини елемента підсилення.

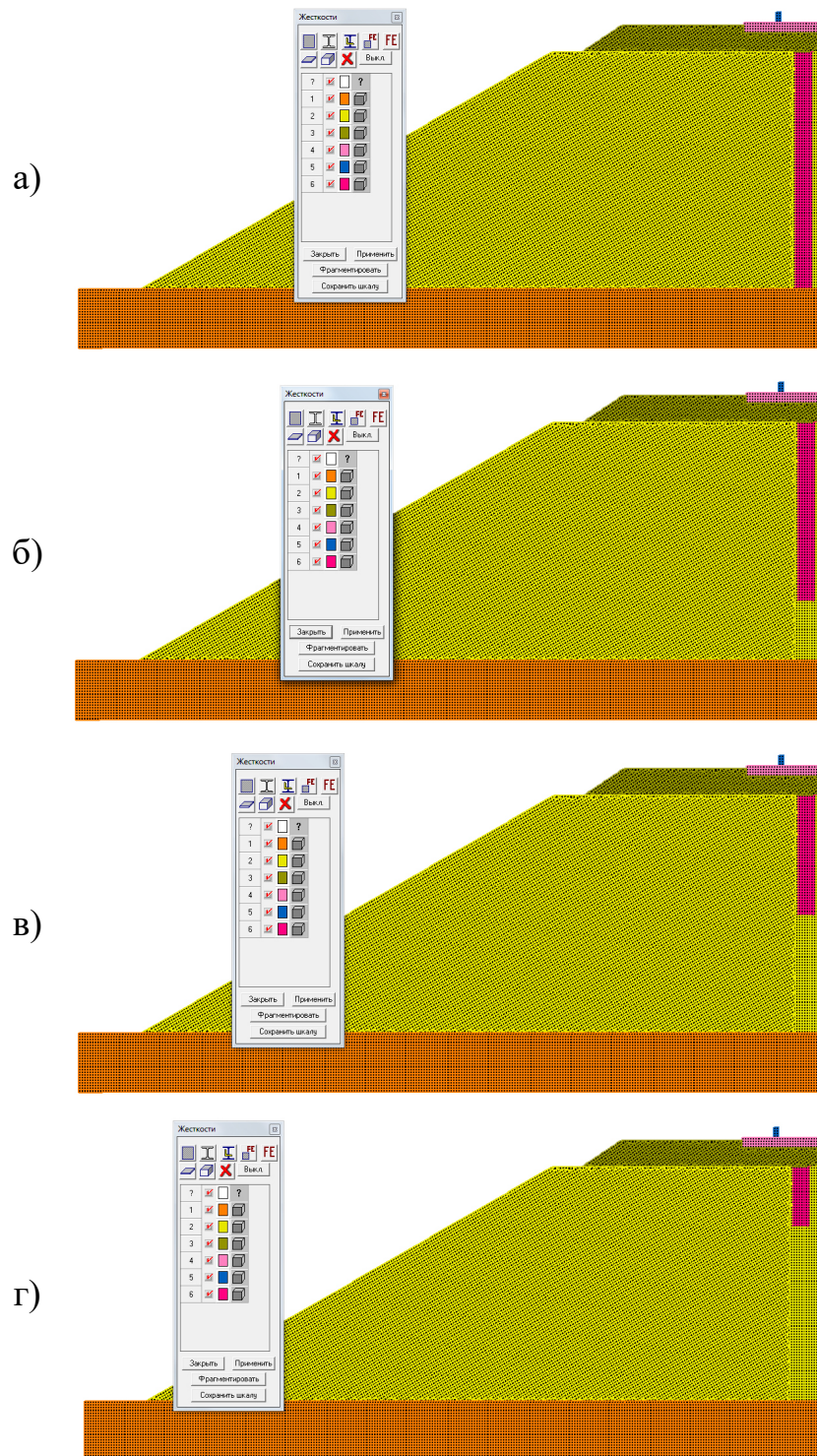
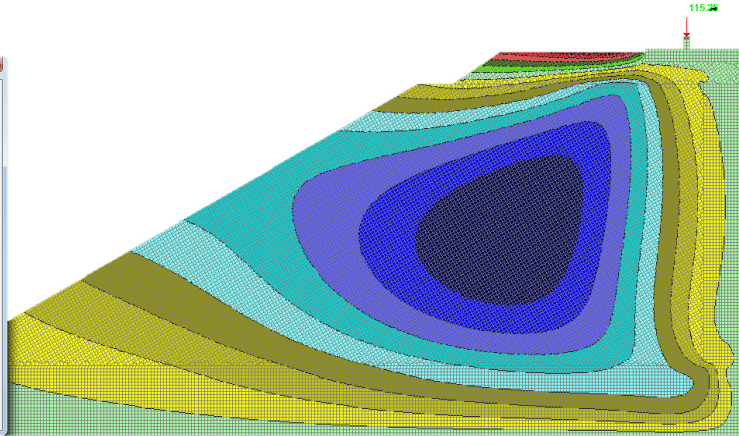


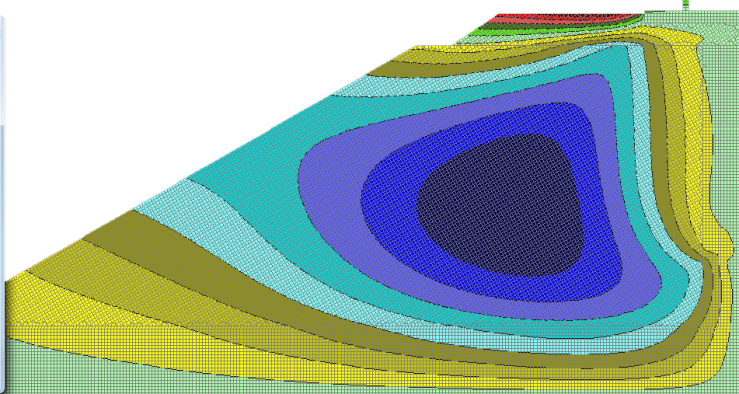
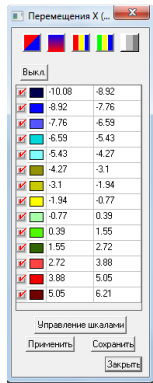
Рисунок 3.10 – Карти розподілення деформаційних характеристик в SE-моделях із варіацією довжини: а) 4 м; б) 3 м; в) 2 м; г) 1 м

На рис. 3.11-3.14 наведено результати чисельного аналізу напружено-деформованого стану SE-моделей із варіацією довжини елемента підсилення.

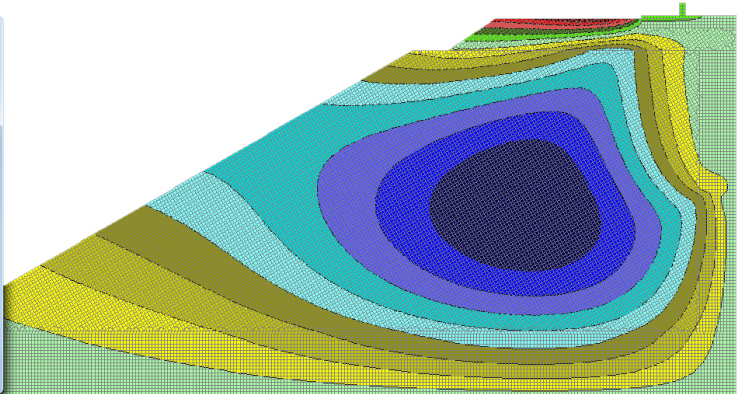
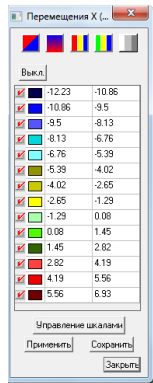
Довжина – 4 м



Довжина – 3 м



Довжина – 2 м



Довжина – 1 м

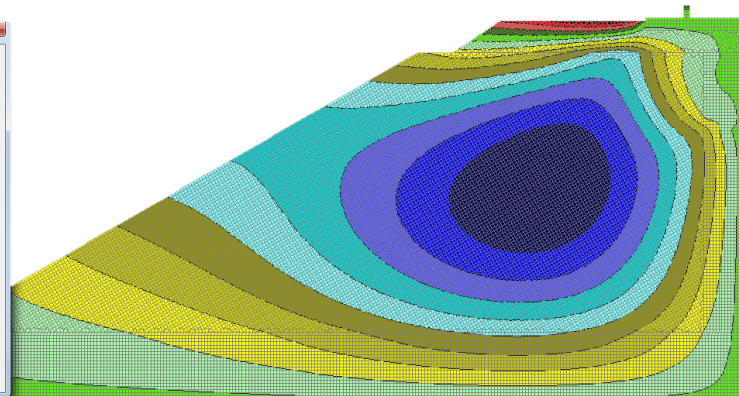


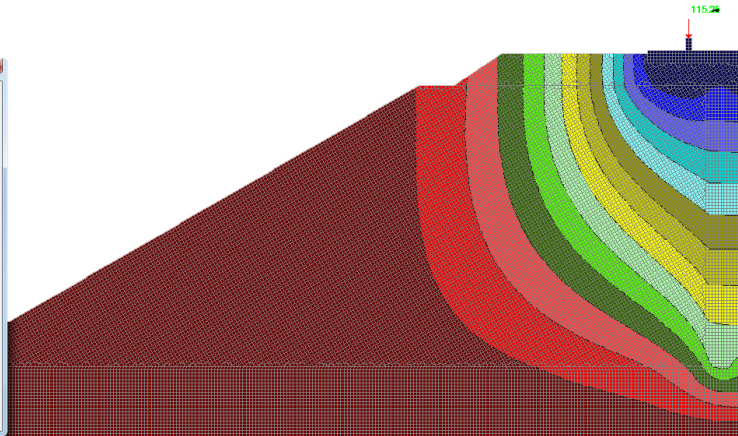
Рисунок 3.11 – Ізолінії та ізополя переміщень по осі X (горизонтальна) в моделях із варіацією довжини

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

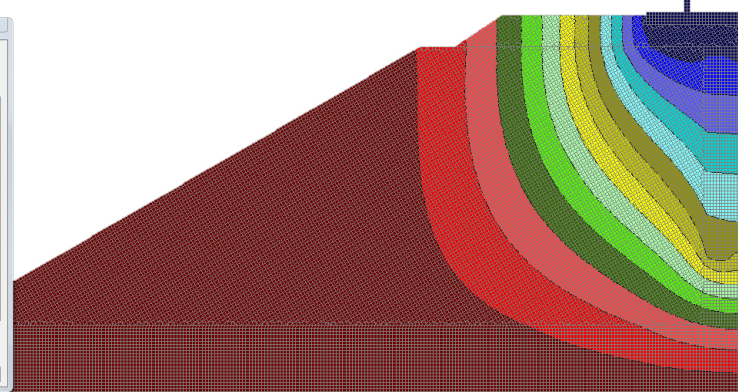
011.196103.MP.2020.000

Арк.

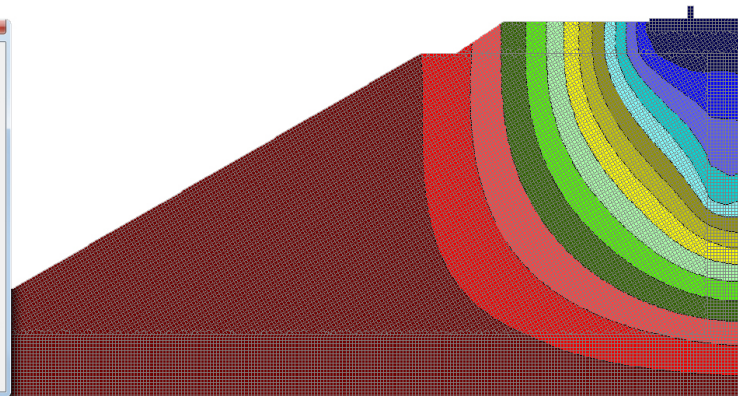
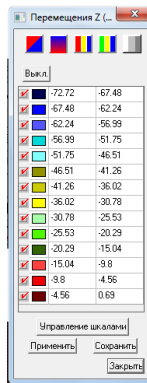
Довжина — 4 м



Довжина — 3 м



Довжина — 2 м



Довжина — 1 м

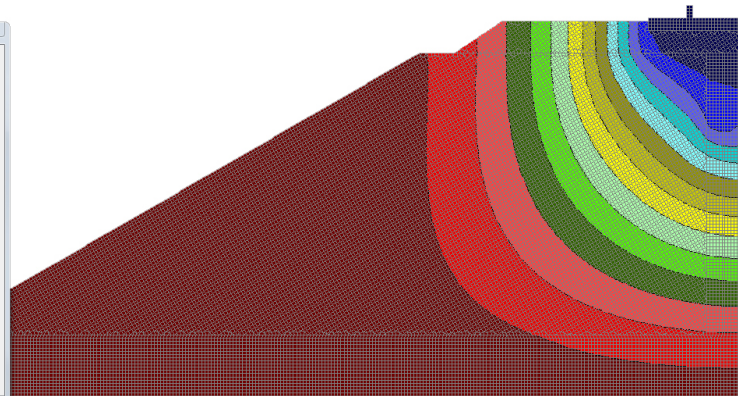
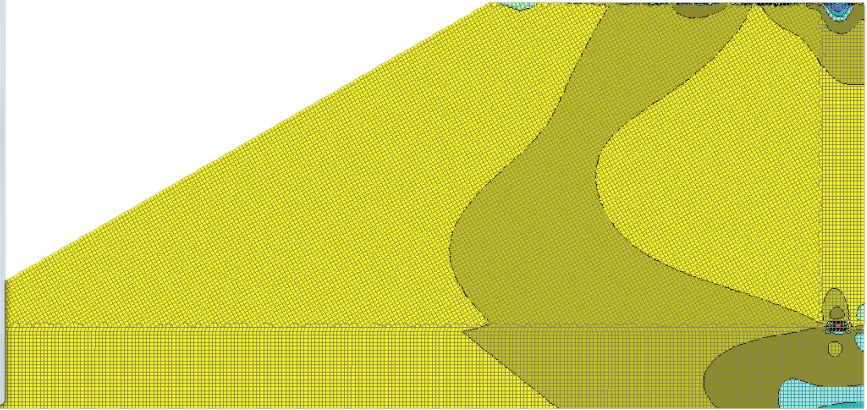
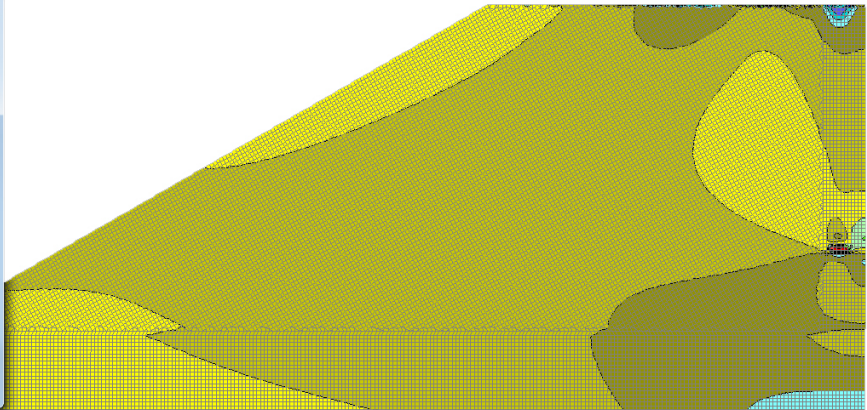


Рисунок 3.12 – Ізолінії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) в моделях із варіацією довжини

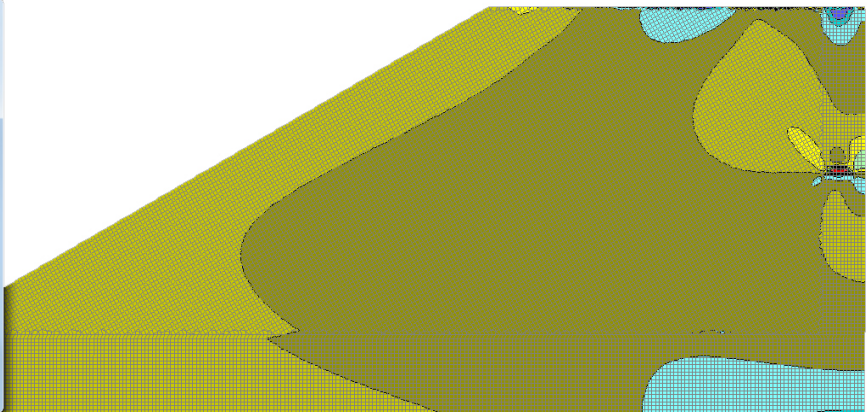
Довжина – 4 м



Довжина – 3 м



Довжина – 2 м



Довжина – 1 м

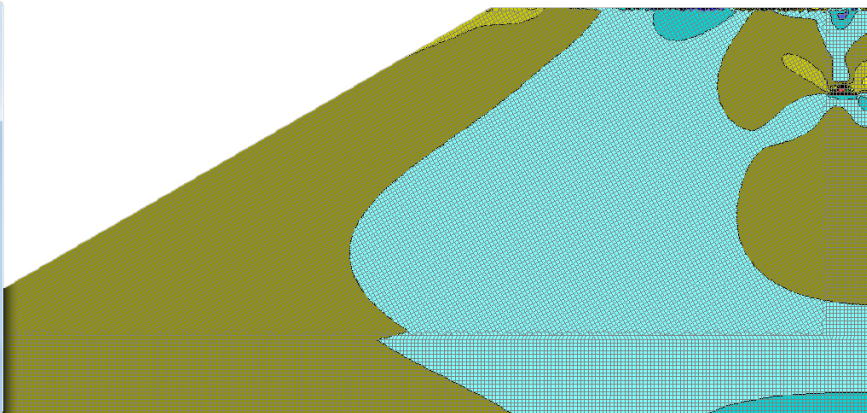
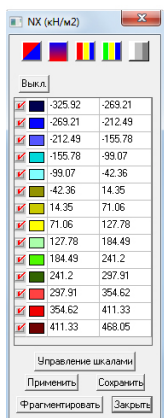


Рисунок 3.13 – Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі Х (горизонтальна) в фрагменті моделей (земляне полотно) із варіацією довжини

На основі отриманих результатів побудовано графіки залежностей переміщень та напружень від довжини елемента підсилення (рис. 3.15-3.18).

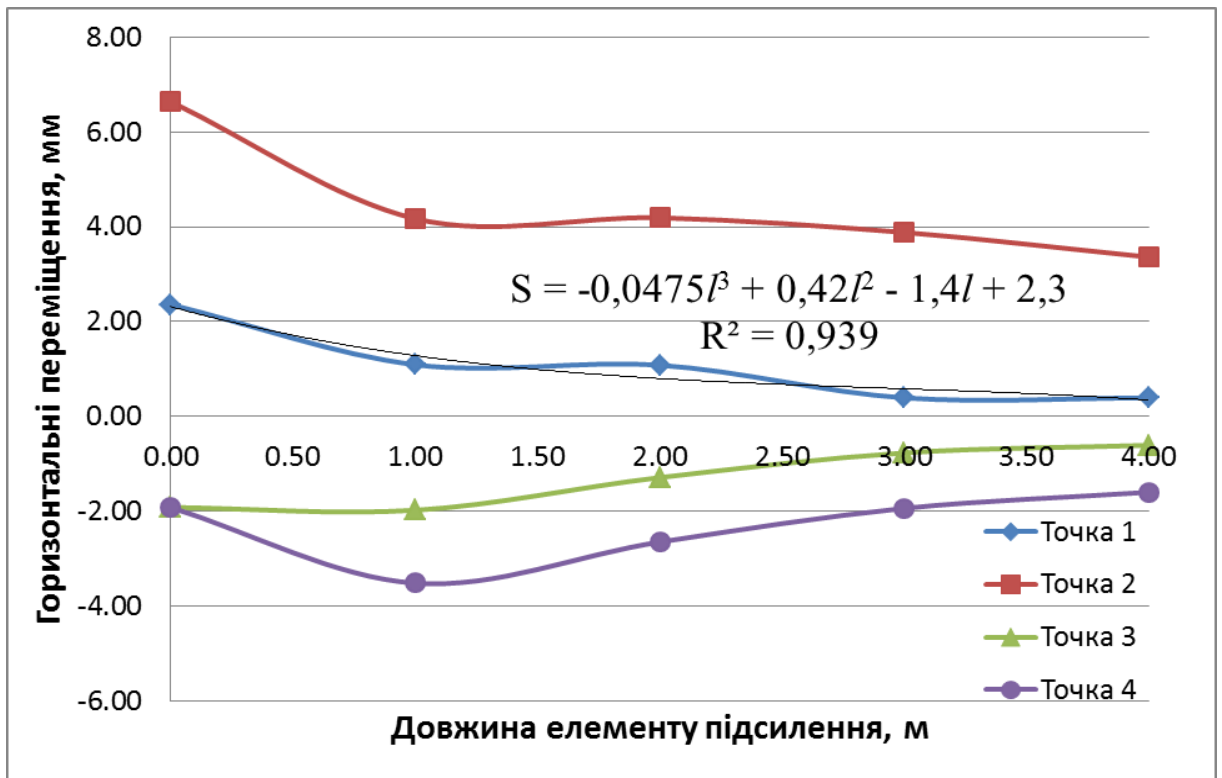


Рисунок 3.15 – Графік залежності горизонтальних переміщень (мм) від довжини елемента підсилення

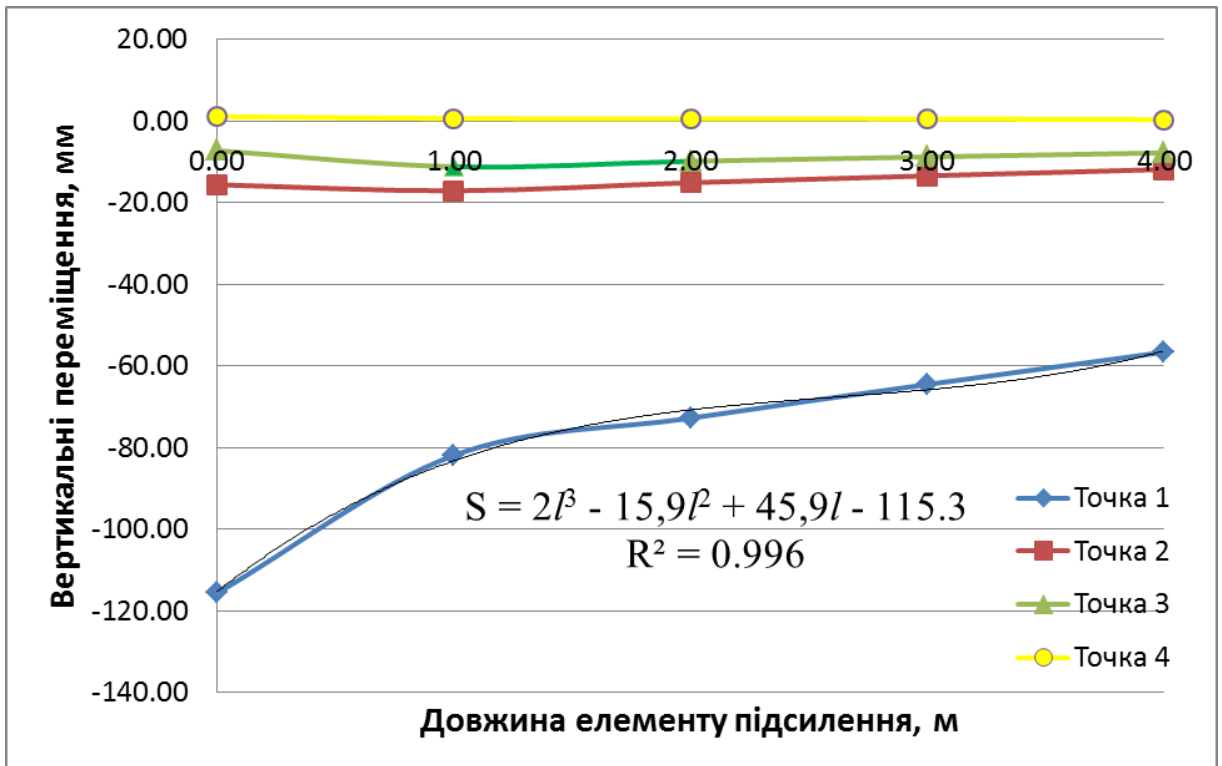


Рисунок 3.16 – Графік залежності вертикальних переміщень (мм) від довжини елемента підсилення

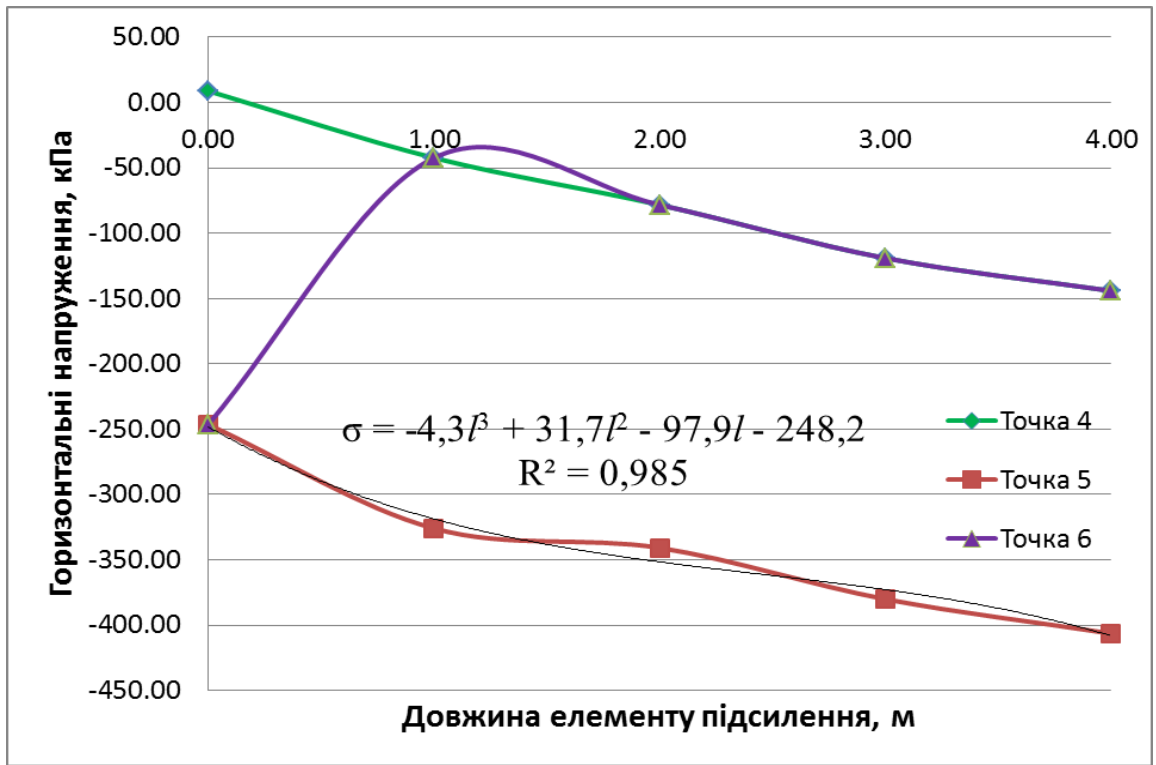


Рисунок 3.17 – Графік залежності горизонтальних напружень (кПа) від довжини елемента підсилення

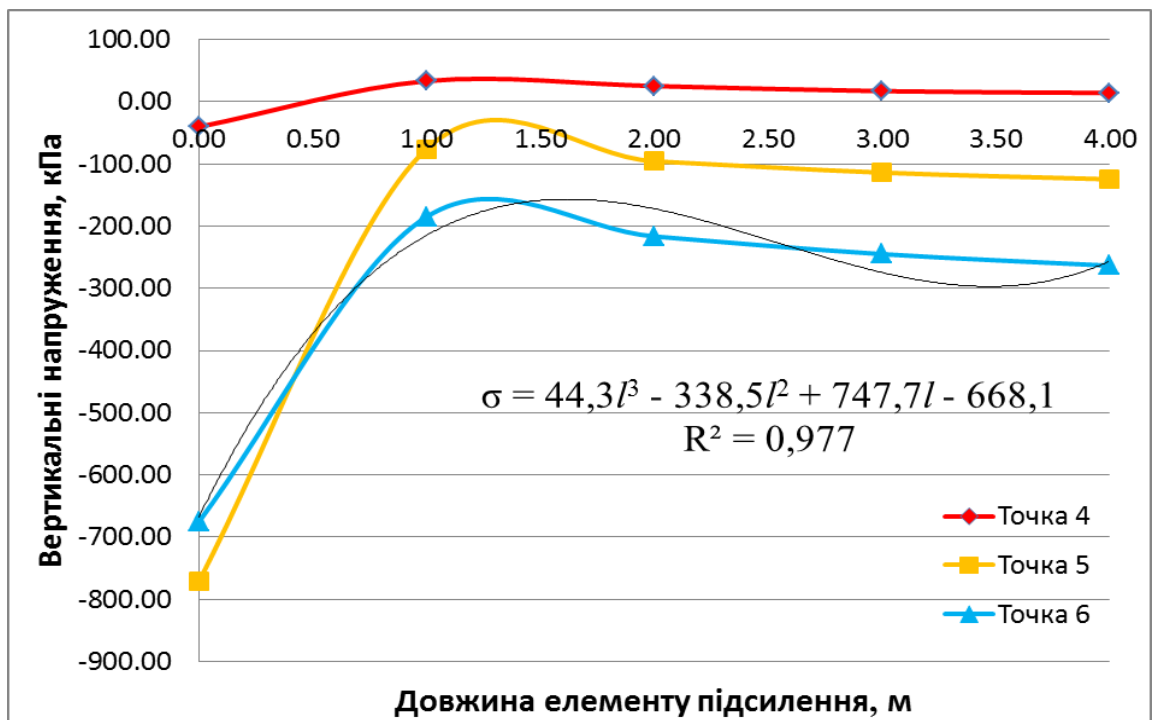


Рисунок 3.18 – Графік залежності вертикальних напружень (кПа) від довжини елемента підсилення

Були апроксимовані графіки, що відповідають найбільш представницьким точкам вимірювань: для горизонтальних та вертикальних

Розділ 4

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Вимоги безпеки праці під час виконання земляних робіт по підсиленню земляного полотна елементами, створеними на основі бурозміщувальної технології

При цих роботах використовуються машини та механізми:

- щибенеочищуюча машина RM-80;
- гідравлічна система з монітором та бурозміщувальним долотом;
- екскаватор EO-2621A;
- скрепер.

Перелік робіт по підсиленню земляного полотна елементами, створеними на основі бурозміщувальної технології:

- очищення щебеню;
- розробка котловану;
- буріння та заповнення свердловин ґрунтоцементним розчином;
- зворотна засипка котловану.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів під час підсилення земляного полотна елементами, створеними на основі бурозміщувальної технології

Перелік шкідливих факторів:

1. Порушення нормального метеорологічного режиму.
2. Підвищений виробничий шум, що перевищує гранично допустимий.
3. Виробничі вібрації з параметрами, що перевищують санітарно допустимі величини.
4. Вплив хімічних речовин.
5. Тривала напруга окремих груп м'язів (незручні змушені пози, тривале стояння на ногах і підняття ваги).

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допускається у межах призми обвалення після перевірки розрахунком міцності кріплень виїмки з визначенням величини і допустимої інтенсивності навантаження.

Ґрунт, що виймається з виїмки, необхідно укласти на відстані 0,5 м від краю виїмки, за якої не виникає небезпека обвалення стінок виїмки.

У разі розміщення у котлованах, траншеях виїмках робочих місць їх розміри повинні бути достатніми для розміщення конструкцій, устаткування, оснащення. Необхідно також забезпечити проходи до робочих місць і на робочих місцях шириною у проясненні не менше ніж 0,6 м, а на робочих місцях – необхідний простір у зоні робіт.

Виїмки, що розробляються на вулицях, проїздах, дворах населених пунктів, в інших місцях можливого перебування та пересування людей або транспорту, повинні бути огорожені захисними огорожами.

На огорожах повинні бути нанесені попереджувальні написи, а в нічний час – встановлене сигнальне освітлення.

Для проходу людей через виїмки повинні бути улаштовані перехідні містки, які освітлюються у нічний час.

Для спускання людей у котловани і траншеї та евакуації з них повинні бути передбачені маршеві сходи шириною не менше ніж 0,6 м з огороженням або приставні драбини (дерев'яні довжиною не більше ніж 5,0 м).

На влаштування траншей глибиною більше ніж 1,5 м необхідно розробляти проєкт кріплень з урахуванням діючого навантаження на призму обвалення. Одночасно разом з тим повинні бути розраховані всі елементи кріплень – переріз кріпильних дощок, відстань між стояками, переріз розпірок, стояків, анкерів.

У разі перевищення зазначених величин, а також у стиснених виробничих умовах, у ґрунтах, що насичені водою, повинні бути передбачені кріплення.

До початку витягування ґрунту з виїмок за допомогою бадей повинні бути встановлені згідно з ПВР захисні навіси-козирки для захисту працюючих у виїмках.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконання робіт у виїмках глибиною більше ніж 1,5 м дозволяється лише ланкою у складі не менше двох працівників.

Під час улаштування і закріплення штучних основ необхідно вживати заходів із запобігання впливу на працівників таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- розташування робочих місць поблизу перепаду по висоті 1,3 м і більше;
- підвищене значення напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

За наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів, безпека улаштування штучних основ повинна бути забезпечена відповідно до вимог проєктно-технологічної документації (ПОБ, ПВР тощо) на виконання цих робіт зокрема:

- дотримання вимог допуску працюючих до виконання робіт;
- дотримання безпечних способів і методів виконання робіт з улаштування штучних основ і фундаментів;
- вибір засобів механізації для виконання робіт;
- розроблення та дотримання схем монтажу, демонтажу, переміщення по будівельному майданчику засобів механізації;
- забезпечення безпечної експлуатації бурового інструменту;
- визначення номенклатури та забезпечення необхідної кількості засобів колективного та індивідуального захисту працівників.

До початку робіт наказом роботодавця повинна бути призначена особа, відповідальна за безпечне виконання робіт. Ця особа повинна вивчити геологічні та гідрологічні умови, розміщення підземних та наземних комунікацій.

Під час виконання робіт особливу увагу необхідно приділяти:

- підземним комунікаціям;
- поверхневим водам (зі швидким підніманням їх рівня);
- напірним підземним водам;
- незатампованим розвідувальним свердловинам;

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робіт значення сигналів та засобів взаємодії, що подаються під час виконання робіт;

– дозволено виконання робіт тільки вдень і на спланованому майданчику з твердою основою;

– всі з'єднання конструкцій повинні бути виконані з використанням передбаченої кількості кріпильних елементів.

Під час улаштування стін траншей забороняється:

– опускатися у відкриту траншею;

– перебувати в межах небезпечної зони екскаватора;

– виконувати проходку свердловин, улаштування траншей, монтаж конструкцій за швидкості вітру 12 м/с і більше.

Улаштування стін траншей, необхідно здійснювати з додержанням вимог безпеки праці та ПВР.

На місцях виконання робіт необхідно вивісити плакати зі схемами та зображенням засобів строкування, обмежувальних пристроїв, бетоноводів, бункерів, іншого обладнання.

Дія працівників при виникненні аварійних ситуацій

При виконанні земляних робіт можливі такі аварійні ситуації:

– пошкодження прихованих трубопроводів з можливим викидом небезпечних рідин, парів, газів та ураження цими речовинами працівників;

– ураження працівника струмом;

– «тепловий удар»;

– випадкове виникнення в котлованах козирків з ґрунту;

– поява в укосах ознак зсуву та сповзання ґрунту;

– інші аварійні ситуації, безпосередньо непов'язані з земельними роботами.

Кожен працівник, що першим виявив загрозу виникнення аварійної ситуації, повинен негайно припинити роботу та подати команду «Стоп».

Команду «Стоп», подану будь-яким працівником, повинні негайно виконати всі

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працівники, які почули її.

Про загрозу виникнення або про виникнення аварійної ситуації працівник повинен негайно повідомити керівника робіт (виконроба).

У разі виявлення у траншеях або котлованах небезпечного газу, роботи повинні бути негайно припинені, а люди виведені з небезпечної зони. Про це слід негайно повідомити безпосереднього керівника (відповідальному виконавцю робіт). Роботи можуть бути відновлені тільки після припинення надходження в зону робіт газу і надійного провітрювання виїмки вентилятором.

При ушкодженні якої-небудь підземної споруди, що створює небезпеку для працівників, необхідно негайно припинити роботу в цьому місці, покинути небезпечну зону і повідомити про це безпосереднього керівника.

При ураженні працівника електричним струмом при роботі з електроінструментом, звільнити потерпілого від дії електричного струму:

- негайно відключити електроінструмент; перерубати або перерізати провід будь-яким інструментом з ізольованою ручкою;
- відокремити потерпілого від струмопровідних частин, використовуючи діелектричні захисні засоби або інші ізолюючі предмети.

При тепловому ударі потерпілого необхідно віднести в прохолодне місце (тінь) і бризкати водою в обличчя.

При пораненнях, падінні, і тому подібному, що виникли під час виконання робіт або аварійних ситуаціях негайно надати потерпілому першу медичну допомогу, а при необхідності до потерпілого викликати лікаря, або направити його в медичний заклад.

При випадкових утвореннях в траншеях і котлованах козирків з ґрунту необхідно негайно припинити роботу, покинути небезпечну зону, після чого козирки слід завалити зверху.

При появі в укосах ознак зсуву і сповзання ґрунту необхідно негайно припинити роботу і залишити небезпечну зону. При цьому слід перевірити за участю керівника робіт (виконроба) положення ґрунту і завалити зверху ґрунт, у якому утворилися тріщини і навіси. Роботи можуть бути відновлені тільки

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

після усунення небезпеки.

При загрозі виникнення або при виникненні інших аварійних ситуацій, не пов'язаних безпосередньо з земляними роботами, діяти відповідно до своїх обов'язків згідно з Планом ліквідації аварій.

При виникненні аварії або ситуацій, які можуть призвести до нещасних випадків слід негайно припинити роботи і повідомити свого безпосереднього керівника.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

1. Проведено аналіз хвороб земляного полотна та питання проєктування його підсилення, зокрема армуванням геосинтетичними матеріалами, малодеформативними шарами, за допомогою хімічного закріплення та бурозмішувальної технології. В ході аналізу з'ясовано, що найбільш ефективним способом підсилення є армування на основі занурення елементів підсилення (паль), що створюються на основі бурозмішувальної технології.

2. Застосовано методику математичного моделювання земляного полотна за допомогою методу скінченних елементів та розроблено алгоритм розрахунку підсиленого земляного полотна з допомогою комплексу SCAD, що враховує наявність в моделі елементів підсилення, створених на основі бурозмішувальної технології.

3. Для математичного моделювання земляного полотна, підсиленого елементами підсилення, створеними на основі бурозмішувальної технології, для більшого врахування реальних характеристик об'єкту розроблено скінченно-елементну модель на основі автоматичної тріангуляції, яка найбільш адекватно відображають геометрію та характер навантажень.

4. Виконано математичне моделювання непідсиленого земляного полотна (Варіант 0) із трьома варіантами підсилення (Варіант 1 – палі біля баластної призми; Варіант 2 – палі біля шпали; Варіант 3 – палі біля рейки), який довів, що найбільш ефективним варіантом підсилення земляного полотна є Варіант 3, який зменшує вертикальні переміщення в 2,04 рази на відміну від Варіанту 0 та покращує напружений стан, зменшуючи вертикальні напруження у 6,19 разів.

5. Відмічено неоднорідність напружено-деформованого стану, викликану зануренням більш жорстких на відміну від ґрунту земляного полотна елементів, причому перенапруження під шпалою відбувається у всіх варіантах підсилення: у Варіанті 1 – 1,52 рази та у Варіанті 3 – 1,65 рази більше, ніж у Варіанті 0.

6. Проведено обґрунтування технології підсилення земляного полотна на основі бурозмішувальної технології, для чого досліджено вплив варіації геометричних параметрів елементів підсилення, створених за допомогою

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бурозмішувальної технології. На основі Варіанту 3 розроблено скінченно-елементні моделі із варіацією довжини (1,0; 2,0; 3,0; 4,0 м) вказаних елементів.

7. Графік залежності горизонтальних та вертикальних переміщень від довжини елемента підсилення апроксимований поліномом третього порядку із величиною достовірності апроксимації $R^2=0,939$ та $0,996$, що свідчить про майже функціональний характер тренду. У точках 3 і 4 підсиленних варіантів із різною довжиною елемента підсилення, в яких вимірювалися горизонтальні переміщення, відбувається збільшення значень, а у точках 1 і 2 – зменшення, причому при 1...2 м – в 2,09 рази, а 3...4 м – 6,05 рази для горизонтальних та зменшення вертикальних переміщень при варіації довжини відповідно: 4 м – 2,04 рази, 3 м – 1,79 рази, 2 м – 1,59 рази, 1 м – 1,41 рази.

8. У Варіанті 3, що прийнятий як найбільш ефективний для зниження переміщень та напружень, варіація довжини елемента підсилення, створеного за бурозмішувальною технологією, більше впливає на деформований, ніж на напружений стан, а обрати її можна, користуючись отриманими поліномами третього порядку.

					011.196103.MP.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. – 70 с.

27. Петренко, В. Д. Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, В. І. Крисан, В. В. Крисан // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2019. – № 16. – С. 65-74.

28. Полевиченко, А. Г. Деформации земляного полотна, меры предупреждения и способы ликвидации [Текст] / А. Г. Полевиченко. – Хабаровск, ДВГУПС, 1999. – 29 с.

29. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії [Текст]: №732-Ц, Київ. – 2002.

30. Прокудин, И. В. Упругопластическое деформирование слабого основания земляного полотна железных и автомобильных дорог [Текст] / И. В. Прокудин, А. К. Черников, Г. М. Стоянович // Изв. ВУЗов. Строительство. 1997. – №11. – С. 102-109.

31. Рекомендації по застосуванню геосинтетичних матеріалів при будівництві та ремонті автомобільних доріг [Текст]. РВ. 3.2 – 218 – 02070915 – 496: 2005, Київ, 2005 – 57 с.

32. Рувинский, В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна [Текст] / В. И. Рувинский. – Москва : Транспорт, 1982. – 166 с.

33. Стандартные проектные решения и технологии по переустройству инженерных сооружений при подготовке железных дорог к введению скоростного движения пассажирских поездов. Выпуск 3. – Москва, 1999.

34. Технические указания по применению нетканых материалов для усиления земляного полотна: ЦП-4591/МПС СССР. Главное управление пути. – Москва : Транспорт, 1989. – 47 с.

35. Тимофеева, Л. М. Армирование грунтов. Теория и практика. Ч. 1. Армированные основания и армогрунтовые подпорные стены [Текст] / Л. М. Тимофеева. – Пермь, 1991. – 480 с.

36. Титов, В. П. Усиление земляного полотна длительно

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

эксплуатируемых железных дорог [Текст] / В. П. Титов. – Москва : Стройздат, 1980. – 272 с.

37. Фадеев, А. Б. Решение осесимметричной смешанной задачи теории упругости и пластичности методом конечных элементов [Текст] / А. Б. Фадеев, А. Л. Прегер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 4. – С. 25-27.

38. Яковлева Е. В. Влияние армирования на деформации основной площадки [Текст] / Е. В. Яковлева // Железнодорожный транспорт. 1998. – № 11. – С.24-26.

39. Яковлева, Т. Г. Способы усиления насыпей армогрунтовыми конструкциями [Текст] / Т. Г. Яковлева, В. В. Виноградов, Ю. К. Фроловский // Путь и путевое хозяйство. 1997. – № 1. – С. 7-10.

40. Brandl, H. Special applications of geosynthetics in geotechnical engineering / H. Brandl, D. Adam. // Proceeding of the Second European Geosynthetics Conference. – Bologna, Italy, 2000. – Vol. 2. – P. 27-64.

41. Cancelli, P. Geogrid construction damage resistance: Preliminary test results / P. Cancelli, F. Montanelli // Proceeding of the Second European Geosynthetics Conference. – Bologna, Italy, 2000. – Vol 2. – P. 883-887.

42. Jones, D. A comparison of geomembranes/geotextiles interface shear strength by direct shear and ring shear / D. Jones, N. Dixon // Proceeding of the Second European Geosynthetics Conference. – Bologna, Ital., 2000. – Vol. 2. – P. 929-932.

43. Krysan V. I., Krysan V. V., Petrenko V., Tiutkin O., Andreev V. Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements // 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019).

44. Huang, Jie 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment / Jie Huang, Jie Han // Geotextiles and Geomembranes. – 2009. – №27. – P. 272-280.

45. Mitchell, James K. Soil Reinforcement for stabilization of Earth Slopes

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

and Embankments / James K. Mitchell, Willem C. B. Villet, Albert F. Dimillo // «Public Roads». 1984. – № 3. – P. 88-95.

46. Matharu, M. S. Geogrids cut ballast settlement rate on substructures / M. S. Matharu // Railway Gazette International, 1994 – № 3. – P. 165-166.

47. Petrenko, V. D. Simulation of Subgrade Embankment on Weak Base / V. D. Petrenko, I. O. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 198-204.

48. Petrenko V. D. Estimation of subgrade strengthening influence using soilcement elements / V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, I. O. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 161-168.

49. Petrenko, V. D. Complex analysis of subgrade stress-strain state with combined strengthening / V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, I. O. Sviatko, A.M.M. Alhdur // Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2017. – Вип. 1 (48). – С. 165-174.

50. Pshinko, O. Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles / O. Pshinko, V. Petrenko, A. Tiutkin, V. Andrieiev, A. Hubar, D. Ihnatenko, R. Markul // TRANSPORT MEANS 2019. Sustainability: Research and Solutions. Proceedings of 23rd International Scientific Conference (2-4 October, 2019), Part II, pp. 820-828.

51. Radkevych, A. V. Comparative analysis of the parameters of the strength of the subgrade at the transition to the higher axial loading up to 25 t. / A. V. Radkevych, V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, V. S. Andrieiev, N. A. Mukhina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708 (2019), Number 1, 012024

52. Shukla, S. K. Generalized Mechanical Model for Geosynthetic-Reinforced Foundation Soil / S. K. Shukla, S. A. Chandra // Geotextiles and Geomembranes. – 1994. –№ 13. – P. 813-825.

					011.196103.МР.2020.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		