

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету/ІНЦ)

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

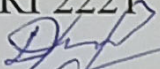
Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Дослідження роботи ґрунтів земляного полотна при різних навантаженнях**

освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство»

і спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»  
(шифр і назва спеціальності)

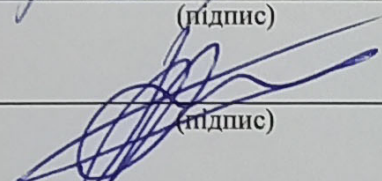
Виконав: групи: КГ2221

студент   
(підпис студента)

/Денис МОСКАЛЬЧУК /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:   
(підпис)

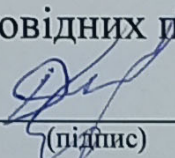
/доцент Володимир АНДРЕЄВ /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:   
(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

  
(підпис)

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technologies**

**Building, architecture and infrastructure**

(faculty/TRC)

**Transport infrastructure**

(department)

**Explanatory Note  
to Master's Thesis**

**Master**

(higher education degree)

on the topic: **Study of subgrade soils under different loads**  
according to educational curriculum Railway structures and track facilities  
in the Specialization: 273 Rail transport

(Specialization and its code )

Done by the student of the group: **KT2221 / Denis MOSKALCHUK /**

(name, surname)

Scientific Supervisor: **/Associate Professor Volodymyr  
ANDRIEIEV /**

(position, name, surname)

Normative controller : **/Head of Dept. Oleksii TIUTKIN/**

(position, name, surname)

Dnipro – 2024

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Залізничні споруди та колійне господарство»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»  
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата

01.03.2023

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Москальчуку Денису Євгеновичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження роботи ґрунтів земляного полотна при різних навантаженнях»

Керівник роботи: Андрєєв Володимир Сергійович, к.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом від «01» березня 2023 р. № 196ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу літературних джерел, що отримані під час пошуку в Internet.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1.. Розділ 2. Розділ 3. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, до 10 слайдів).

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Розділ 1 - 3	Андрєєв В.С		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1		
2	Розділ 2		
3	Розділ 3		
4	Висновки. Оформлення ВКР.		
5	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.		
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2024	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Денис МОСКАЛЬЧУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Володимир АНДРЕЄВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: **Дослідження роботи ґрунтів земляного полотна при різних навантаженнях** складається з 68 стор., 38рис., 6 табл., 23 літературних джерел.

Метод дослідження – аналітичний.

Дипломну магістерську роботу присвячено питанням зміцнення та дослідженню роботи ґрунтів земляного полотна залізниць.

Ключові слова: **ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ ПОЇЗД, ЛІКВІДАЦІЯ, ТРАНСПОРТНА ПРИГОДА, ПОЖЕЖА, ТРИКУТНИК БЕЗПЕКИ.**

**ЗМІСТ**

ВСТУП	стор 7
<b>1 АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЗМІЦНЕННЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА</b>	8
1.1 ОГЛЯД ДЕФОРМАЦІЙ УКІСНИХ ЧАСТИН ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, СПОСОБІВ ЗМІЦНЕННЯ	8
1.2 ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ АРМУВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	17
<b>2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АРМУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗМІЦНЕННІ УКОСІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА</b>	24
<b>3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА СПОСІБ ЗМІЦНЕННЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА</b>	51
<b>ВИСНОВОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ</b>	66
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК</b>	70

## ВСТУП

Наявність дефектного земляного полотна, протяжність якого оцінюється фахівцями приблизно в 6% від загальної протяжності мережі залізниць. На цьому протягом нижня будова колії працює на межі своєї несучої здатності і підвищення навантаження на нього може призвести до критичних наслідків.

В зв'язку з цим особливо актуальним стає питання підвищення несучої здатності експлуатованого земляного полотна. У ситуації, що склалася пріоритетним напрямком є вдосконалення методів зміцнення земляного полотна, що дозволяють ефективно проводити проектування та посилення експлуатованої інженерної споруди без обмеження руху.

Нині набувають широкого поширення способи глибинного ущільнення, армування і зміцнення ґрунтів, що дозволяють проводити роботи з укосів і узбіч земляного полотна. Однак ці методи мають ті чи інші обмеження в разі, якщо постає питання про ліквідацію баластних заглиблень земляного полотна пізній стадії розвитку (баластних мішків і баластних гнізд), як відомо, характеризуються початком зсувних переміщень укісних частин. Напрямок дослідження зміцнення земляного полотна, ослабленого баластними заглибленнями пізній стадії розвитку, є перспективним і актуальним, що вимагає комплексного підходу. Дослідження повинні бути спрямовані на ефективне посилення ґрунтів насипу без перерв у русі поїздів, що, в свою чергу, може стати суттєвим кроком вперед у вирішенні питання зміцнення земляного полотна.

# 1 АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЗМІЦНЕННЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

## 1.1 ОГЛЯД ДЕФОРМАЦІЙ УКІСНИХ ЧАСТИН ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, СПОСОБІВ ЗМІЦНЕННЯ

Земляне полотно є фундаментом верхньої будови колії, і від його несучої здатності залежить надійність всього інженерної споруди. Протяжність земляного полотна, що має в своїй будові дефектні місця, налічує тисячі кілометрів і близько 6% загальної протяжності залізниць.

Найбільш небезпечним видом деформацій земляного полотна залишається втрата стійкості укисних частин, оскільки, незважаючи на досить тривалий формування дефектів, що призводять до втрати стійкості, їх реалізація відбувається досить швидко і призводить до виходу з ладу всього перегону.

Відповідно до класичних описів процесів руйнування укисних частин земляного полотна [1 ... 4] існує два основних види втрати стійкості укусу - місцева втрата стійкості і загальна втрата стійкості.

Місцева втрата стійкості, пов'язана зі зміщенням поверхневих шарів ґрунту укусу, як правило, обумовлена процесами фізичного вивітрювання, соліфлюкційної течії ґрунтів і формування баластних шлейфів. Загальна втрата стійкості є більш небезпечним видом деформації земляного полотна, так як в цьому випадку поверхню зсуву укусу проходить досить глибоко і провокує обвал основного площадки.

Формування і розвиток дефектів, що призводять до загальної втрати стійкості укусу, як правило, відбувається в результаті комплексного впливу різних причин і факторів, серед яких особливо слід відзначити перезволоження ґрунтів, збільшення поїзної навантаження, а також людський фактор, що полягає в помилках при проектуванні і будівництві. Сполучення зазначених факторів призводять до утворення обводнених зон насипу, що проявляються у вигляді баластних заглиблень [5].

До баластових заглиблень прийнято відносити дефекти основної площадки земляного полотна, що формуються в результаті вдавнення в ґрунт матеріалу баластної призми [5, 7], що відбувається внаслідок неякісного пристрою або відсутності розділових шарів верхньої будови колії (подушки баластної призми, геосинтетичного розділового шару). При цьому в основній площадці утворюються локальні поглиблення, що акумулюють воду. При водонасиченні ґрунтів відбувається зниження їх механічних характеристик, що сприяє інтенсивному розвитку поглиблення. За ступенем розвитку і місця локалізації заглиблень розрізняють баластні корита, баластні ложа, баластні мішки, баластні гнізда і баластні кишени.

*Баластні корита* є першою стадією формування баластного поглиблення і являють собою односторонні (під одною рейковою ниткою) або двосторонні (під двома рейковими нитками) поглиблення, що не перевищують 300 мм.

При відсутності своєчасних заходів щодо усунення баластних корит відбувається їх розвиток, з'єднання і освіту баластних лож. Сформоване баластні ложе є витягнуте уздовж осі колії і розвинене під обидві рейкові нитки поглиблення потужністю не більше 500мм.

Накопичення в баластному ложе води в поєднанні з постійними динамічними навантаженнями призводить до розвитку заглиблень в тіло земляного полотна. При цьому утворюються замкнуті поглиблення значних розмірів - баластні мішки. Одним з характерних ознак розвитку даного поглиблення є поява тріщин на поверхні укусу земляного полотна, що говорить про формування поверхні обвалення укусу.

Подальший розвиток баластних мішків призводить до утворення відростків, розвинених в сторону укісних частин насипу, - баластних гнізд та *баластних кишень*. Дана стадія розвитку баластних заглиблень є найбільш небезпечною і характеризується початком зсувних переміщень укусу.

Проведені раніше дослідження показують, що розвинені баластні поглиблення стають однією з основних причин загальної втрати стійкості укісних частин насипу. Розвитку деформацій в цьому випадку сприяють

значне зволоження ґрунту в галузі освіти баластного поглиблення, низькі міцнісні характеристики матеріалу, заповнює поглиблення, і постійно діюча динамічне навантаження.

Серед відомих способів зміцнення насипів, що мають у своїй будові розвинені баластні поглиблення, слід виділити найбільш ефективні - вирізка баластного поглиблення із заміною його дренируючим ґрунтом, осушення баластових заглиблень шляхом влаштування кротячого дренажу і дренажних прорізів, армування ґрунтів, нагнітання в баластні поглиблення розчинів в'язучих для витіснення води і створення протифільтраційного завіси.

Найбільш надійними заходами по відновленню експлуатаційної надійності земляного полотна є вирізка і заміна ґрунтів земляного полотна з одночасним укладанням капіляророзривних і теплозахисних покриттів [25]. Однак проведення даних заходів неможливо без обмеження руху, що в сукупності з великими обсягами земляних робіт тягне за собою значні економічні втрати. У зв'язку з цим значна увага приділяється методам відновлення земляного полотна, реалізація яких можлива без перерв у русі поїздів.

Основним питанням, що виникають при зміцненні земляного полотна без вирізки баластного поглиблення, є видалення води із зони водонасичення. Широке поширення в цьому напрямку отримали способи дренажного осушення земляного полотна, коли в тіло насипу з використанням установок для горизонтального буріння занурюються трубчасті дренажі [8]. Занурення дренажів виконують таким чином, щоб прийомна частина труби перебувала в найбільш низькій точці баластного поглиблення, при цьому в самопливному режимі вода видаляється з тіла земляного полотна. Недоліком такого способу ремонту земляного полотна є самопливне видалення води, яке не гарантує повного осушення баластного поглиблення, а також те, що в цьому випадку не обмежується подальший доступ води в баластні поглиблення. Крім того, дані заходи не дозволяють стабілізувати розвиваються зсувні зрушення укосу.

В розвиток цього напрямку ремонту земляного полотна були розроблені способи осушення баластових поглиблень з одночасним зміцненням ослаблених

масивів ґрунту. Так, наприклад, відомий спосіб зміцнення земляного полотна, що складається в одночасному осушення і армуванні ґрунтів. Спосіб полягає в створенні пристрою, що включає розміщену в тілі земляного полотна дренажну трубу, забезпечену водозабірним пристроєм, і оголовок, жорстко з'єднаний з дренажною трубою і занурений в тіло укосу. При цьому оголовок виконує функцію анкерного елемента.

Даний спосіб дозволяє підвищувати стійкість укосів, проте не забезпечує повного осушення баластного поглиблення, так як видалення вологи відбувається в самопливному режимі. Крім того, що залишилися після осушення, пори заповнюються повітрям, що може викликати просідання основного майданчика земляного полотна. В результаті земляне полотно не буде знаходитися в стабільному стані тривалий час.

Іншим варіантом одночасного осушення і зміцнення баластного поглиблення є спосіб, що включає виготовлення дренажних свердловин, занурення ін'єкторів, спрямоване видалення води з земляного полотна через дренажні свердловини шляхом нагнітання твердіючого розчину. Цей спосіб забезпечує ефективне видалення води з баластного поглиблення з одночасною заміною її твердіючим розчином, що надає додаткову міцність і водонепроникність основному майданчику.

Даний спосіб дозволяє ефективно осушити і зміцнити баластні поглиблення, проте в разі, якщо укисні частини знаходяться в стані граничної рівноваги, застосування цього способу обмежене, так як нагнітання розчину може спровокувати обвалення укосу.

Розглянуті способи мають ряд переваг, що дозволяють виділити їх серед інших способів ремонту земляного полотна. Перш за все слід зазначити можливість проведення робіт без перерв у русі поїздів, що дозволяє істотно підвищити економічну ефективність в порівнянні з альтернативними варіантами. Для реалізації цих методів використовуються доступні технічні засоби і матеріали. Ефективність їх застосування підтверджена практикою впровадження на об'єктах російських залізниць. У зв'язку з цим слід більш

детально зупинитися на розгляді способів армування і ін'єкційного зміцнення ґрунтів земляного полотна залізниць.

*Метод армуючих конструкцій* заснований на обмеженні розвитку деформацій в зоні впливу споруди в тому чи іншому напрямку за рахунок створення в ґрунтовій середовищі конструкцій з лінійних, плоских або об'ємних елементів. Армування ґрунту є одним з методів перетворення його властивостей, коли в ґрунтову середу вводяться елементи, що забезпечують сприйняття підвищених стискаючих і розтягуючих напружень.

Армування ґрунту розрізняють за такими ознаками:

- по виду армуючих елементів - набивними, буронабивними, забивними і ґрунтовими палями; буроін'єкційними палями; анкерами; металевими стрижнями і смугами; геотекстилем; полімерними плівками; волокнами, нитками, кордової тканиною;
- з текстурованими ознаками - анізотропне і ізотропне;
- за характером розташування армуючих елементів - вертикальне;
- горизонтальне; похиле в одному, двох і більше напрямках; ніздрюватими структурами; об'ємно-дисперсне;
- за способом виробництва робіт - забиванням, затискуванням і віброзануренням; пристроєм свердловин і ін'єкцією; закладом в свердловини з наступним заливанням і ін'єкцією; розкладкою; із застосуванням струминного технології; замиву і засипанням.

Армування ґрунтів в залізничному будівництві має досить широке поширення, оскільки спрямована на підвищення стабільності підстави і основного майданчика насипу, надання стійкості крутим схилах і влаштування підпірних ґрунтових стін.

Одним із способів армування ділянок насипів з розвиненими баластними шлейфами є використання стягають конструкцій [5]. Суть методу полягає в пристрої в насипу наскрізних горизонтальних або **похилих** свердловин, введення в свердловини арматури з подальшим її натягом спеціальними натяжними пристроями і закріпленням на залізобетонних плитах, що лежать на укосах насипу. Таке рішення застосовується для зміцнення розвинених баластних

шлейфів насипів висотою від 6,0 до 18,0 м. Довжина стягиваючого елемента (не більше 20,0 м) визначається технічними можливостями застосовуваного устаткування для буріння горизонтальних свердловин, що влаштовуються з невеликим ухилом (1-2<sup>0</sup>/оо).

Одним з напрямків армування ґрунтів є використання анкерних пристроїв. Широкі теоретичні, експериментальні та дослідні дослідження по вивченню роботи ґрунтових анкерів почали проводитися ще з 70-х рр. минулого століття. В даний час відомо велика кількість різних конструкцій анкерних пристроїв.

По виду використовуваного матеріалу розрізняють металеві, бетонні, залізобетонні, дерев'яні, композитні та комбіновані конструкції анкерів.

Анкерні конструкції за принципом дії і конструктивним особливостям підрозділяються на два види:

- а) гнучкі анкерні конструкції;
- б) жорсткі анкерні конструкції.

По розташуванню в просторі анкерні пристрої поділяють на вертикальні, горизонтальні та похилі.

При використанні анкерних конструкцій для кріплення насипів, ослаблених баластними заглибленнями, доводиться стикатися з певними труднощами, що полягають у відсутності міцних корінних порід, в які можна зробити закріплення нижнього анкера.

Відомий метод армування насипів ґрунтоцементні мікропалі діаметром 70-100 мм і довжиною 1,5-2 м. Суть методу полягає у формуванні в ґрунті циліндричної порожнини (свердловини) з подальшим заповненням її міцніючим розчином. Формування порожнин виконується, як правило, з використанням спеціального агрегату, робочий орган якого складається з пучка ін'єкційних наконечників, а також способами глибинного ущільнення ґрунту із застосуванням Розкатник свердловин або пневмопробійників.

Зміцнення баластних заглиблень мікропалі утруднено, так як в цьому випадку ґрунти земляного полотна знаходяться в водонасиченому стані і, отже, стінки свердловини не будуть стійкі в період її бетонування. Технологія робіт даними способом не передбачає осушення ґрунтів, а значить, міграція води до

поверхні зрушення буде продовжена. Крім того, проведення робіт по влаштуванню мікропаль можливо тільки в технологічні вікна, тому даний спосіб є економічно конкурентоспроможним.

Перспективним напрямком в зміцненні укісних частин земляного полотна є стрижневе кріплення. В даний час застосування даного способу дозволяє забезпечувати стійкість вертикальних стінок і крутопохилих укосів котлованів армуванням ґрунтового масиву системою стрижнів (ґрунтових нагелів) з подальшим покриттям поверхні ґрунту збірним кріпленням. Особливість роботи стрижневого кріплення полягає в тому, що на відміну від анкерів стрижні залишають поза передачею навантаження на корінні шари ґрунту, а формують армоґрунтових масив, який працює за принципом гравітаційного споруди.

Досвід використання армуючих конструкцій показав наступні їх переваги в порівнянні з традиційними рішеннями:

- зменшення потреби в тимчасових і допоміжних спорудах;
- простота технологічного процесу зведення конструкцій;
- мінімальне порушення геологічної будови інженерної споруди;
- висока надійність і довговічність армоконструкцій;
- геоекологічна безпеку.

Застосування стрижневого кріплення при зміцненні укісних частин земляного полотна з розвиненими баластними заглибленнями без додаткового забезпечення їх зв'язності малоефективно, оскільки ґрунт баластного поглиблення не забезпечить необхідного зчеплення зі стрижнем, в результаті чого відбудеться прослизання і обвалення укосу.

Іншим перспективним напрямком зміцнення насипів, що мають баластні поглиблення, є ін'єкційні методи зміцнення ґрунтів, спрямовані на створення незворотніх змін в зв'язках між окремими мінеральними частинками ґрунту з метою поліпшення його механічних характеристик. Накопичений досвід в цій області досліджень може бути використаний для вирішення питань зміцнення залізничного земляного полотна.

Ін'єкційні фізико-хімічні методи зміцнення ґрунтів засновані на нагнітанні міцніючих розчинів в ґрунт під тиском, що не перевищує його структурної міцності, так званої просочення ґрунтів. Зміцнення відбувається за рахунок затвердіння розчину в порах ґрунту. У практиці зміцнення ґрунтів відомі такі методи просочення, як цементація, силікатизація, смолізація, бітумізація.

Незважаючи на високу ефективність ін'єкційних методів армування, застосування їх в транспортному будівництві обмежена наступними чинниками:

- 1) використання ін'єкційних фізико-хімічних методів ефективно в маловлажних ґрунтах, в той час як більшість деформацій земляного полотна пов'язано з обводненням і перезволоженням ґрунтів;
- 2) більшість фізико-хімічних методів пов'язано з екологічним забрудненням геологічного середовища;
- 3) реагенти, використовувані для зміцнення ґрунтів, як правило, мають високу вартість.

Особливу увагу в питанні фізико-хімічного зміцнення ґрунтів слід приділити методам нагнітання розчину під тиском, що перевищує структурну міцність ґрунту. Процес зміцнення в цьому випадку характеризується розривом структурних зв'язків в ґрунті і заповненням утворилися порожнин твердеючим розчином.

Одним із сучасних способів розривного зміцнення ґрунтів, які мають досить широке поширення, є струменевий технологія, відома також під назвою «jet-grouting», що застосовується з середини 70-х рр. минулого століття в Японії, Італії, Англії. Спосіб заснований на гідравлічному руйнуванні ґрунту обертаються високошвидкісними струменями цементного розчину, що нагнітається під тиском 30-50 МПа. В результаті структура ґрунту повністю руйнується і відбувається перемішування його частинок з розчином з утворенням однорідної маси, яка з часом твердне.

Іншим способом зміцнення ґрунту - нагнітанням розчину під високим тиском стала технологія гідророзриву. Вивченню питань зміцнення ґрунту

гідророзривом приділялося багато уваги в 60 - 70-х рр. минулого століття, і досить повно дана технологія викладена в роботах А. Камбефора.

Нагнітання розчину напірної ін'єкцією виконується при тиску від 0,05 до 1,5 МПа. В результаті відбувається розрив структури ґрунту і заповнення утворилися порожнин розчином, що призводить до ущільнення ґрунту і підвищення його механічних характеристик. Крім того, несуча здатність ґрунту збільшується за рахунок армування утворюються лінзами розчину.

Проведені раніше дослідження дозволили встановити, що при нагнітанні твердіє розчину в недренуючих ґрунтів можливе формування лінз різної конфігурації. Виявлено три найбільш поширеній конфігурації затверділого розчину - масивні елементи діаметром близько 40 см, плоскі прошарки і стовпи неправильної форми. Також встановлено, що формування даних включень залежить від технології і параметрів нагнітання розчину.

Найбільш поширеною формою твердіння розчину є стовп неправильної форми, що утворюється вздовж ін'єктора при його поступовому вилученні з ґрунту. Діаметр утворюється стовпа змінюється від 4 до 25 см, при цьому відбувається ущільнення навколишнього ґрунту в радіусі 30 см від стовпа.

Для нагнітання розчину в тіло земляного полотна використовуються різні конструкції ін'єкційних труб, що дозволяють проводити нагнітання як висхідним, так і тих, що сходять способами. Це дозволяє розширити спектр вирішуваних завдань, оскільки з'являється можливість проводити нагнітання розчину в будь-якому напрямку, що, в свою чергу, дозволяє створювати в ґрунті оконтурені зони і вести спрямоване видалення води з зон обводнення.

Перевагами методу напірної ін'єкції є:

- незалежність від проникності ґрунту, що дозволяє зміцнювати слабкі глинисті ґрунти, де використання традиційних ін'єкційних методів обмежена;
- використання недорогих і розповсюджених матеріалів і устаткування.

Однак при наявності розвинених баластних заглиблень, коли вже простежується тенденція до обвалення укосу, суцільна опрацювання нестабільного масиву ґрунту напірної ін'єкцією може привести до початку

зсувних переміщень. У зв'язку з цим необхідно розглянути можливість розрідження точок ін'єктування і видалення їх від потенційної поверхні обвалення укосу.

## 1.2 ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ АРМУВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Аналіз досвіду армування земляного полотна показує, що армируючі елементи необхідно диференціювати за принциповою розрахунковою схемою їх роботи. В цьому відношенні слід розрізняти три основних типи армуючих елементів - лінійні, плоскі і об'ємні.

При розгляді граничного стану руйнування для лінійних елементів слід враховувати продавлювання ґрунту через елементи прослизання по їх бічній поверхні, в зв'язку з чим межа міцності конструкції визначається фактичним опором ґрунту при контакті з бічною поверхнею армуючих елементів. У разі армування баластного поглиблення зміцнення підлягають великоуламкові ґрунти з глинистим заповнювачем, що знаходяться в стані текучої консистенції, що вказує на нездатність армуючих елементів чинити істотний опір продавлювання і прослизанню ґрунту.

Граничний стан руйнування для плоских армуючих елементів характеризується також проскальзиванням ґрунту, але при забезпеченні належного зчеплення елемента з навколишнім ґрунтовим середовищем слід враховувати міцність самого матеріалу елемента. У разі баластних заглиблень виникає складність із забезпеченням необхідного зчеплення між заповнювачем поглиблення і армуючим елементом.

Створення достатнього зчеплення між заповнювачем баластного поглиблення і армуючим елементом можливо шляхом влаштування об'ємного армування. У цьому випадку міцність конструкції, що складається з об'ємного елемента і укладеного в ньому ґрунту, залежить в основному від міцності армирующего елемента. Основна складність в реалізації даного способу полягає в технічну неможливість створення об'ємного армирующего елемента в чинній насипу без порушення її цілісності. Однак, незважаючи на це, даний

напрямок дослідження є найбільш перспективним у вирішенні питання зміцнення земляного полотна, ослабленого баластними заглибленнями.

В даний час об'ємні армируючі конструкції представлені, як правило, геоячейками, використовуваними при армуванні основної площадки земляного полотна, підготовці основи для відсипання насипу, поверхневому кріпленні укосів і т.д.. Також в світовій практиці широко використовується спосіб зміцнення основ насипів шляхом влаштування пальового поля з подальшим покриттям його геосинтетичних нетканим матеріалом. В цьому випадку в рівні підосви насипу відбувається розподіл навантаження на окремі вертикальні армиуючі елементи через геосинтетичний матеріал. Дана схема зміцнення основи фактично реалізує принцип об'ємного армування, так як слабкий ґрунт основи виявляється укладеною між армуючими елементами і практично не сприймає навантаження від вищерозташованого насипу.

Подібний принцип армування можна реалізувати також і в насипних ґрунтах, без порушення цілісності ґрунтового масиву (рисунок 1.1). Для цього потрібно створити два рівня плоских армуючих елементів - в основі і на покрівлі зони ослаблення і об'єднати їх між собою вертикальними елементами, які забезпечать зв'язність конструкції.

Створення вертикальних елементів можливо ефективно проводити з використанням ін'єкційних способів зміцнення, зокрема способу напірної ін'єкції, при цьому необхідно застосовувати технологію нагнітання розчину, що дозволяє формувати стовпи затверділого розчину неправильної форми. Створення плоских армуючих елементів в класичному їх вигляді на експлуатованій насипу неможливо, у зв'язку з чим функцію плоского армиуючого елемента виконає система перехресно розташованих лінійних (стрижневих) армуючих елементів.

Аналітично обґрунтувати ефективність створення системи перехресно розташованих стрижнів, в порівнянні з паралельним розташуванням, можна шляхом співвідношення робочих поверхонь цих конструкцій (рисунок 1.2).

При використанні схеми паралельно розташованих стрижнів сумарна поверхню опору буде визначатися загальною робочою поверхнею стрижнів в обраному обсязі зміцнення.

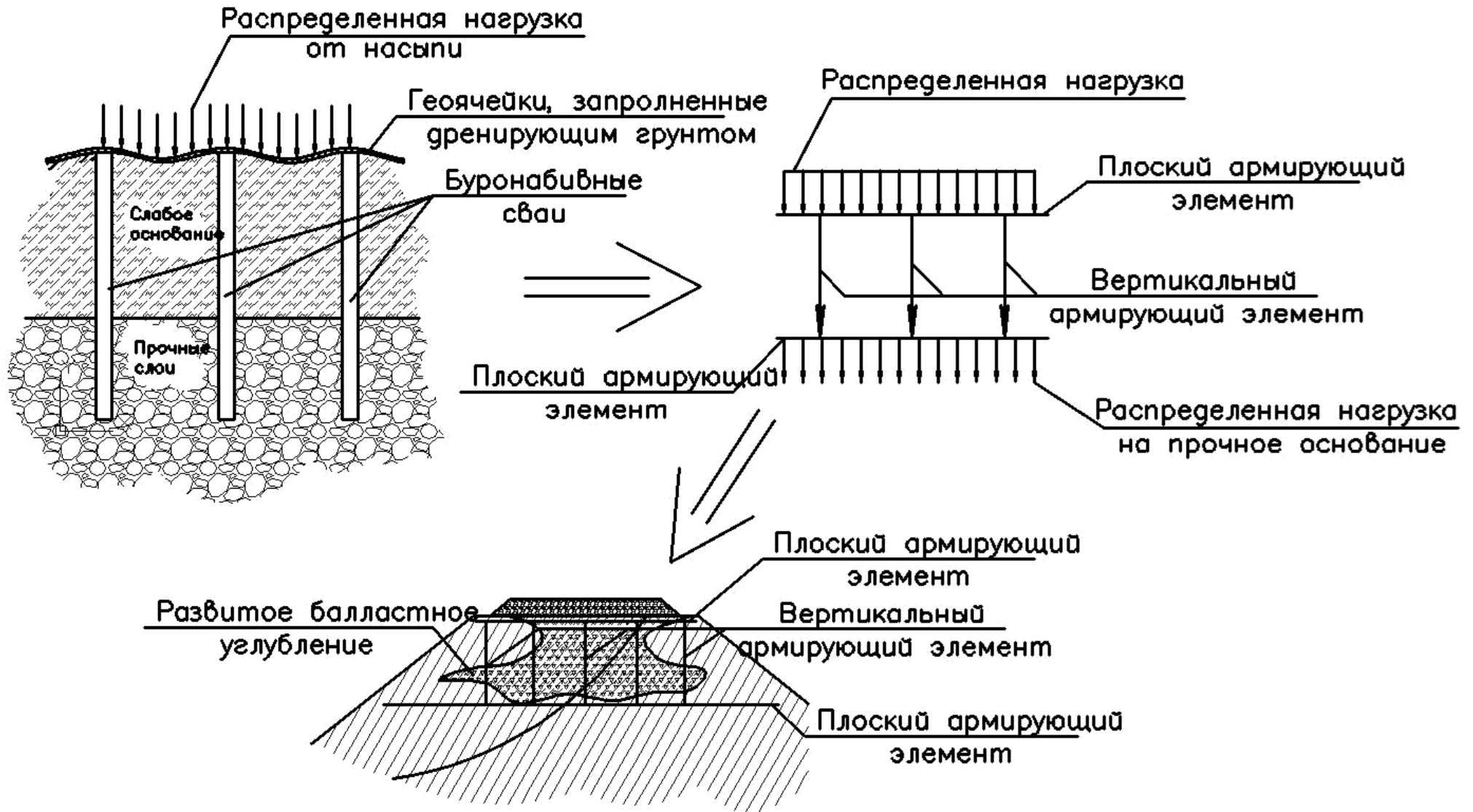


Рисунок 1.1 - Пристрій об'ємного армиуючого елемента в тілі насипу

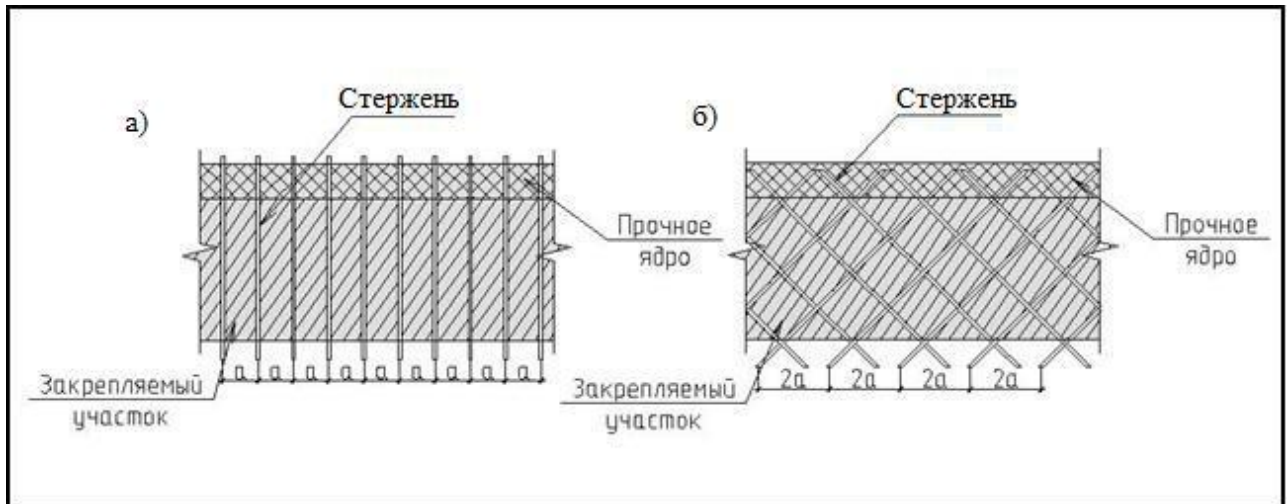


Рисунок 1.2 - Схеми зміцнення насипу:  
а - стрижневе кріплення; б - кріплення сітками

Аналіз літературних даних показує, що найбільш поширені межі варіювання кроку розстановки стрижнів в ярусі знаходяться в межах від  $20d$  до  $50d$ .

У разі використання стрижнів діаметром 28 мм їх кількість в одному ряду складе 19 шт., Сумарна довжина при довжині одного стрижня, що дорівнює 10 м, складе 190 м. Розрахункова поверхневий опір конструкції буде визначатися залежністю:

$$T_{ст} = 16,7 \tau_{тр}$$

У випадку перехресного розташування стрижнів в роботу включається також ґрунт, затиснений в осередках, при цьому передбачається, що дана поверхня працює як плоский армируючий елемент. Ширина елемента визначається проекцією довжини стержня в площину поперечного перерізу насипу, довжина елемента обмежується протяжністю вибраної ділянки:

$$S_{ел} = l_{пр} \cdot L,$$

де  $l_{пр}$  - довжина проекції стержня в площину поперечного перерізу насипу, м;

$L$  - довжина розглянутого ділянки, м.

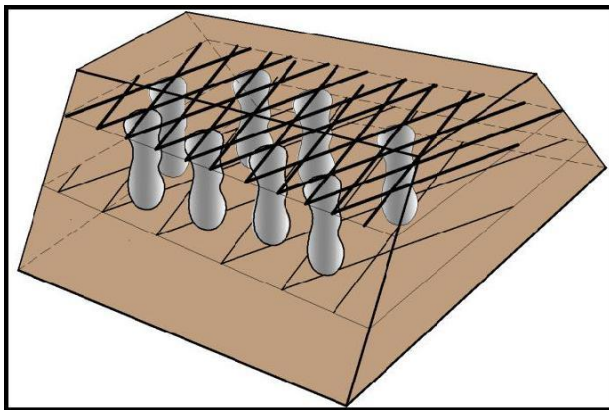
Кількість матеріалу при утворенні сітки збільшується на 18% в порівнянні з стрижневим кріпленням. Технічний ефект застосування сітки в

порівнянні з паралельним розташуванням стрижнів визначається відношенням  $T_{ел} / T_{ст}$  і становить 12 разів.

Таким чином, сутність запропонованої схеми посилення ґрунтів полягає у формуванні в тілі земляного полотна об'ємної анізотропної структури, що складається з горизонтально орієнтованих лінійних армуючих елементів, об'єднаних в єдиний каркас вертикально орієнтованими стовпами неправильної форми, утвореними шляхом нагнітання в певні області насипу твердіє розчину (створення об'ємного багатоелементного армування). Передбачається, що дана конструкція дозволить підвищити міцність і деформаційні характеристики масиву ґрунту, що працює як єдина система (рисунок 1.3).

Однак при розгляді можливості практичного застосування цієї конструкції виникає необхідність обґрунтування ефективності її роботи. Крім того, дослідження повинні забезпечити отримання результатів, необхідних для проектування та реалізації даного способу зміцнення земляного полотна.

а)



б)

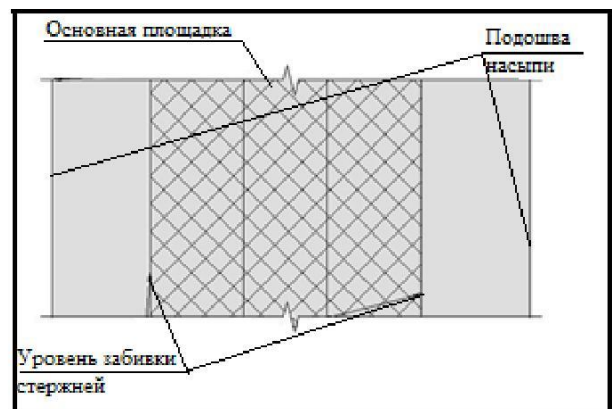


Рисунок 1.3 - Зміцнення насипу об'ємним багатоелементним армуванням:  
а - загальний вигляд насипу; б - схема забивання стрижнів арматури (в плані)

З огляду на специфіку вирішуваних завдань, дослідження роботи даної конструкції слід проводити з використанням різних способів моделювання. При цьому застосування незалежних способів моделювання дозволить

проводити операційний контроль одержуваних даних і своєчасно вносити корективи в програму досліджень.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АРМУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗМІЦНЕННІ УКОСІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Дослідження роботи армуючих конструкцій при зміцненні укосів земляного полотна виконано з використанням чисельного моделювання. Завдання дослідження, яке вирішується в ході проведення чисельного моделювання, полягає в розгляді різних способів армування земляного полотна, що застосовуються при проектуванні зміцнення експлуатованих насипів, і визначенні ефективної схеми зміцнення укісних частин земляного полотна. Для вирішення поставленого завдання сформульовані і вирішені наступні питання:

1. Моделювання роботи експлуатованого земляного полотна, зміцненого армуванням.
2. Отримання якісної картини роботи насипу при різних варіантах армування для визначення оптимальної конструкції армування насипу на стадії проектування.
3. Визначення області застосування об'ємного багатоелементного армування.

Для забезпечення можливості отримання в достатній мірі достовірних результатів моделювання, що дозволяють в подальшому використовувати їх на стадії проектування зміцнення залізничних насипів, необхідно розробити цифрову модель конструкції, максимально повно відображає внутрішні процеси її роботи.

Важливим аспектом моделювання розглянутої конструкції є достовірний опис роботи масивів ґрунту, опрацьованих напірної ін'єкцією. При цьому аналіз, виконаний у розділі 1, показує, що найбільш поширеною конфігурацією твердіє розчину в ґрунті є стовп неправильної форми, в той же час дана конфігурація дозволяє максимально ефективно отримати конструкцію багатоелементного армування. Спираючись на існуючі результати досліджень в області ін'єкції тверднуть розчинів, діаметр даного

стовпа слід прийняти рівним 15 см. Також слід враховувати, що ефективна зона ущільнення ґрунту навколо стовпа досягає 30 см, в зв'язку з чим кінцеве обрис масиву, зміцненого напірної ін'єкцією, слід прийняти як циліндр висотою, рівній глибині опрацювання, і діаметром 75 см. Значення механічних характеристик даного масиву прийняті відповідно до відомим інтегральним залежностям .

Одним з кроків було створення наборів матеріалів, використовуваних для моделювання, серед яких виділено три структурних типу - об'ємний, плоский і лінійний. Стрижневе кріплення створювалося еластичними лінійними елементами круглого поперечного перерізу, модельованими ізотропним матеріалом, що характеризується модулем пружності  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ .

При побудові системи перехресних армуючих елементів кожен елемент моделювався як окремо розташований стрижень. Така конструкція досягнута шляхом закладення різноспрямованих елементів на двох рівнях. Побудова ґрунтового середовища і масивів ін'єкційного зміцнення виконувалося на базі моделі ідеально пластичної середовища Кулона-Мора, що використовує основні параметри пластичності, - питоме зчеплення  $c$ , кут внутрішнього тертя  $\phi$ , коефіцієнт ділатансії  $\psi$ , модуль Юнга  $E$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ .

Сітка кінцевих елементів створювалася з використанням стандартних модулів програми для лінійних, плоских і об'ємних структур, при цьому проводився операційний контроль зв'язності генерованих елементів.

На початку виконані розрахунки різних варіантів зміцнення залізничного насипу для отримання оцінки роботи зміцненої середовища і виявлення найбільш ефективної конструкції армування земляного полотна.

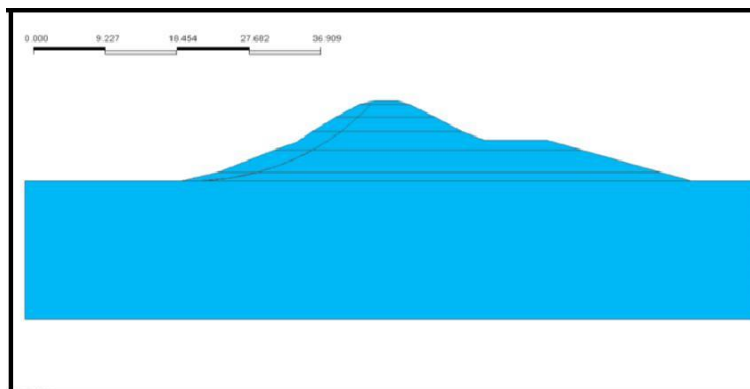
Далі використана модель насипу на ділянці довжиною 10 м, виконана в геометричному масштабі 1: 1 (рис. 2.1).

Дана модель розглядалася в якості базової для дослідження різних варіантів армування.

Для дослідження прийнято чотири варіанти армування залізничного насипу з використанням стрижневого і ін'єкційного зміцнення ґрунтів:

- 1) армування окремими паралельними стрижнями, орієнтованими перпендикулярно схилу, розташованими в чотирьох рівнях по висоті насипу (рисунок 2.2), крок стрижнів прийнятий рівним тридцяти діаметрами стержня (середній крок, відповідно до існуючих рекомендацій до проектування стрижневого кріплення);
- 2) армування окремими перехресно розташованими стрижнями, впровадженими в насип під кутом  $30^0$  до укосу в чотирьох рівнях по висоті насипу (рисунок 2.3) з кроком, рівним тридцяти діаметрами стержня;
- 3) армування насипу окремими масивами зміцненого ґрунту, розташованими в двох рівнях по висоті насипу (рисунок 2.4);
- 4) армування насипу об'ємним багатoeлементним армуванням, параметри якого визначені шляхом поєднання варіанту перехресного розташування стрижнів з варіантом точкового ін'єктування розчину (рисунок 2.5).

а)



б)

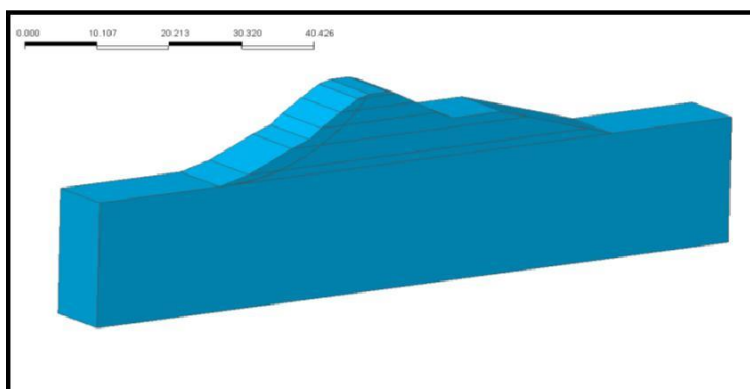
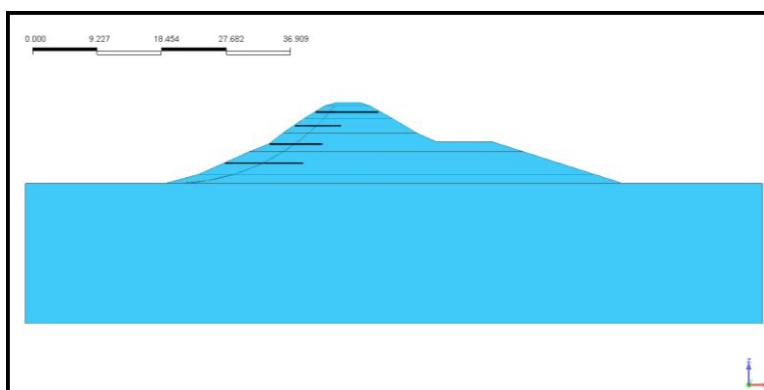


Рисунок 2.1 - Базова модель насипу:  
а - поперечний переріз; б - об'ємний вигляд

а)



б)

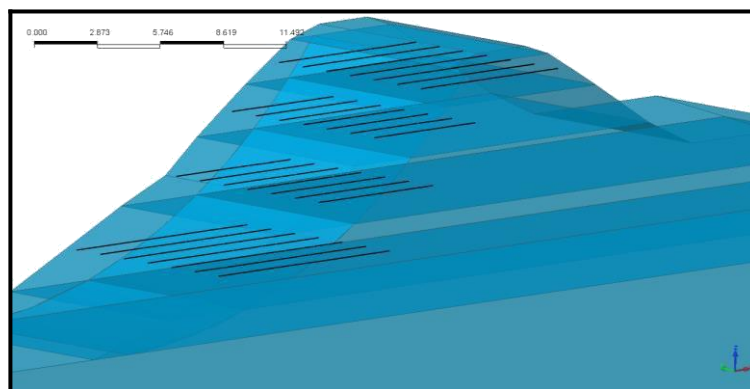


Рисунок 2.2 - Армування паралельно розташованими стрижнями:  
а - поперечний переріз; б-просторово положення стрижнів

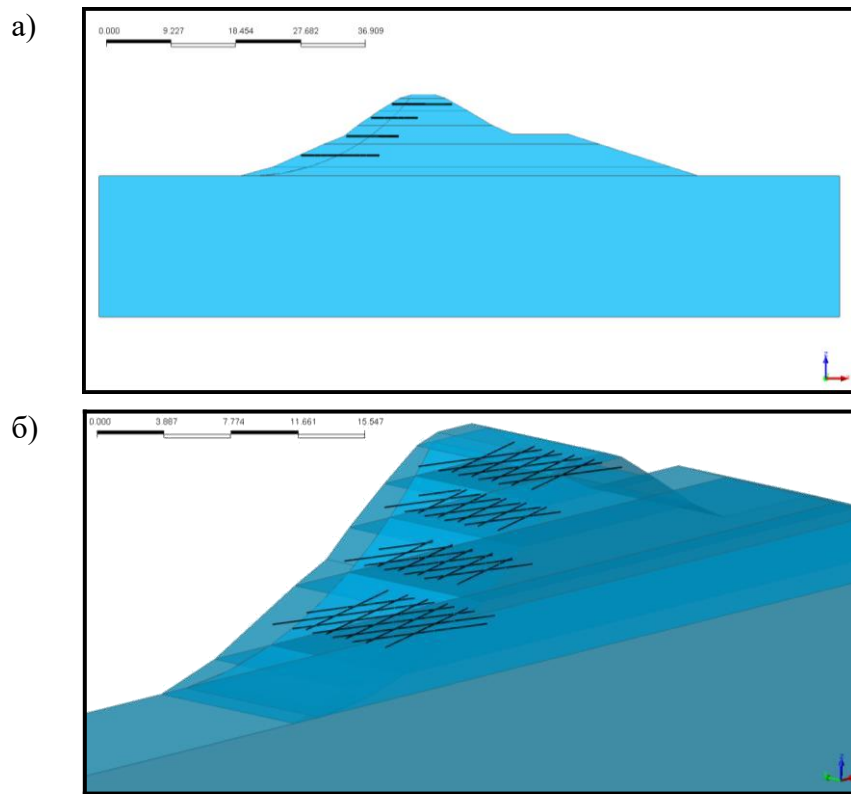


Рисунок 2.3 - Армування перехресно розташованими стрижнями:  
а - поперечний переріз; б - просторове положення стрижнів

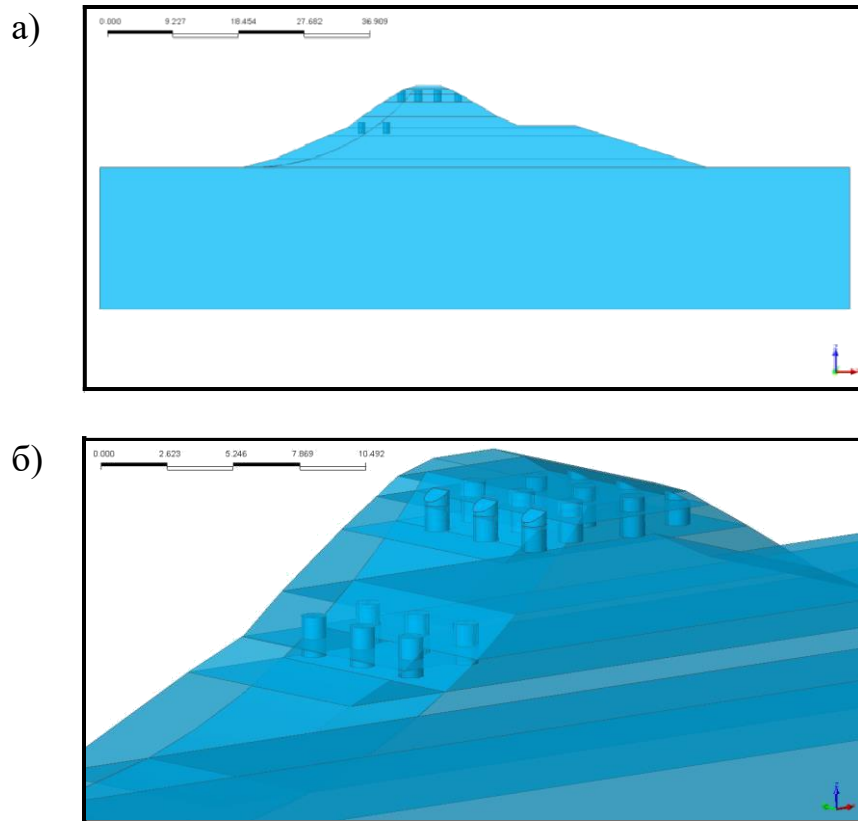


Рисунок 2.4 - Армування окремими масивами зміцненого ґрунту:  
а - поперечний переріз; б - просторове положення стрижнів

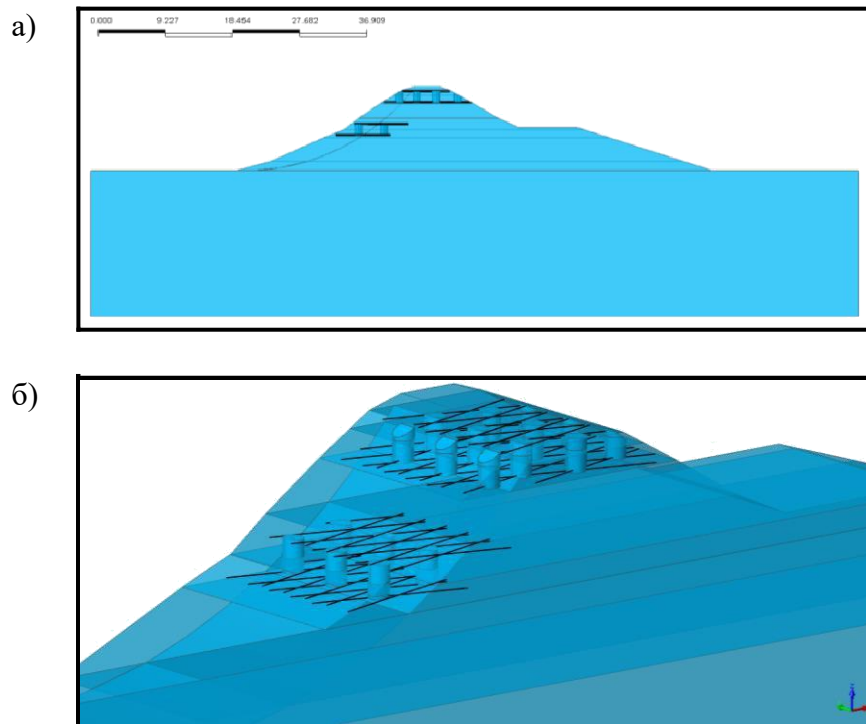


Рисунок 2.5 - Зміцнення об'ємним багатоелементним армуванням:  
а - поперечний переріз; б - просторове положення елементів

Дослідження виконувалися з прив'язкою до реальних інженерно-геологічними умовами залізничного земляного полотна. Проведення комплексу інженерно-геологічних і геодезичних досліджень дозволило локалізувати фрагмент насипу, яка була зведена з глинистих ґрунтів, що має в своїй будові ослаблену зону. В результаті детального обстеження було встановлено точну будову насипу і визначено характер розвитку деформацій (рисунок 2.6).

Ослаблена зона сформована в укiснiй частини i має вихiд на основну площадку земляного полотна, при цьому лiнiя поверхнi вiдриву знаходиться на вiдстанi близько 1 800 мм вiд осi колiї в поперечному перерiзi насипу. Характер формування поверхнi обвалення вказує на те, що в разi реалiзацiї зсувних перемiщень в деформацiї будуть залученi тiльки ґрунти тiла насипу без захоплення основи. Однак слiд зазначити, в рядi випадкiв призма зрушення укiсних частин включає в себе також ґрунти основи, що вiдбувається, як правило, при бiльш глибокому закладеннi поверхнi зрушення. При цьому, оскiльки введення в ґрунт армуючих елементiв може привести до змiни орієнтацiї площадок максимальних дотичних напружень i вiдповiдно сформувати нову поверхню обвалення, необхідно включити в розрахункову модель елементи основи насипу, значення фiзико-механiчних характеристик яких визначенi також в ходi iнженерно-геологiчних вишукувань.

Основнi фiзико-механiчнi характеристики ґрунтiв, використаних при побудовi моделей насипу, наведенi в таблицi 2.1. Обґрунтування критерiю подiбностi виконано згiдно вiдомим теорем.

*перша:* Для двох подiбних процесiв все критерiї подiбностi попарно рiвнi один одному;

*друга:* Критерiї подiбностi пов'язанi один з одним рiвнянням подiбностi в безрозмiрному вирiшеннi;

третя: Два процеси подібні, якщо вони якісно однакові і їх визначають критерії попарно рівні.

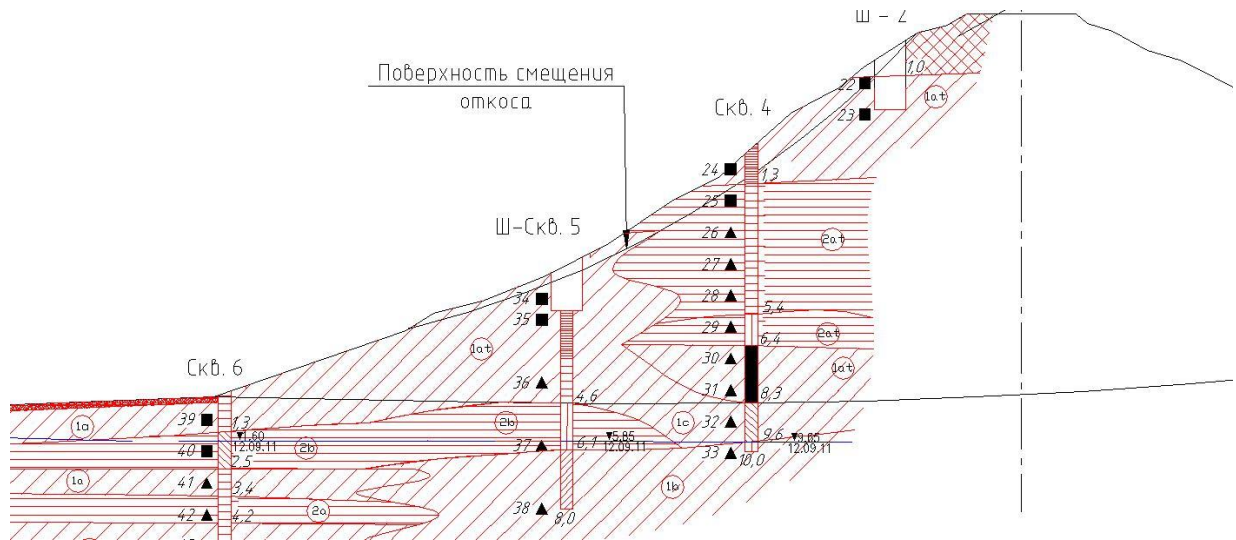


Рисунок 2.6 - Інженерно-геологічна будова насипу

Таблиця 2.1 - Фізико-механічні характеристики ґрунтів моделі

насіпу

Ґрунт	Вологість $W, \%$	густина $\rho, \text{Г} / \text{см}^3$	коефіцієнт пористості $e$	кут внутрішнього тертя $\varphi^0$	питоме зчеплення $z, \text{МПа}$	модуль деформації $E, \text{МПа}$
<b>Міцні шари ґрунту тіла насипу</b>						
ІҒЕ 1at	0,25	1,80	0,824	15,0	0,029	18,0
<b>Слабкі шари ґрунту тіла насипу</b>						
ІҒЕ 2at	0,39	1,82	1,076	10,0	0,004	5,3
<b>Основа насипу</b>						
ІҒЕ 2	0,18	1,96	0,665	23,0	0,029	23,4

Для моделювання десятиметрової насипу в масштабі 1: 5 потрібно виконати насип висотою 2 м, тобто практично реальна інженерна споруда. Для виконання кількох дослідів при різних вхідних параметрах потрібно буде кожного разу дотримуватися ідентичні значення фізико-механічних характеристик ґрунту моделі. Додатковою і дуже великою трудностю є створення силового впливу, практично рівного натуральному.

З метою спрощення завдання щодо укрупнення масштабу моделювання розглянута можливість проведення фрагментного моделювання насипу.

Як моделюваного фрагмента виділена ділянка укосу насипу, що містить у своїй будові ослаблений масив ґрунту, що провокує розвиток зсувних переміщень укосу, при цьому рух відбувається за деякою певної поверхні - поверхні обвалення. На покрівлі та основі ослабленою зони укладаються буферні шари ґрунту. Ці ділянки формують напружено-деформований стан від штампа на кордоні досліджуваної зони.

Таблиця 2.2 - Фізико-механічні характеристики ґрунту моделей фрагментів насипу

Ґрунт	Вологість W, %	густина $\rho$ , Г / см <sup>3</sup>	коефіцієнт пористості e	кут внутрішнього тертя $\varphi^0$	питомий зчеплення c, МПа	модуль деформації E, МПа
Буферні шари ядро насипу	0,18	1,96	0,665	23,0	0,029	23,4
Ослаблен- ная зона	0,39	1,82	1,076	10,0	0,004	4,3

З метою оптимізації досліджень змоделивали тільки дефектну зону насипу з дотриманням всіх граничних умов по напруженням і деформацій контуру обраної зони.

До проведення досліджень прийнято три схеми армування масштабної моделі насипу:

1. Армування ослабленою зони двома рядами паралельно розташованих стрижнів з кроком  $30d$ , де  $d$  - діаметр стержня (рисунок 2.7). У моделі  $d = 6\text{мм}$ , закладення стрижня в щільний шар ґрунту ядра насипу  $0,25b$ , де  $b$  - ширина ослабленою зони (розмір поперек насипу).

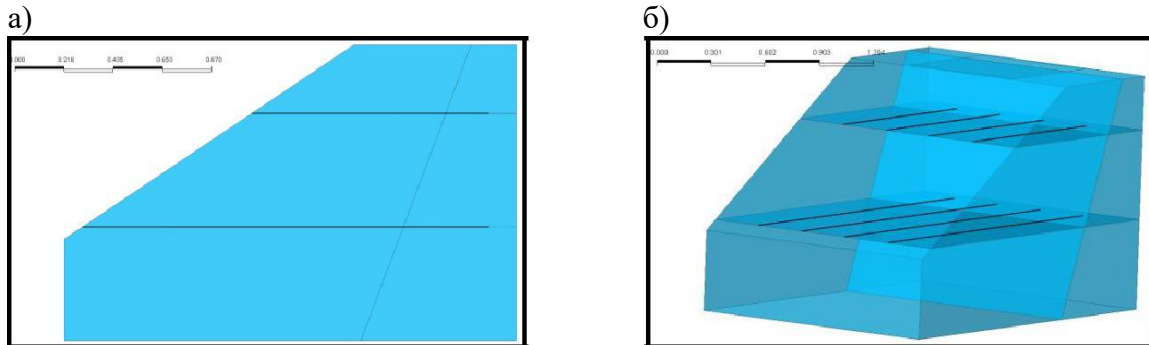


Рисунок 2.7 - Зміцнення насипу стрижневим кріпленням (схема 1):  
а - модель в осях X, Z; б - модель в осях X, Y, Z

2. Армування ослабленою зони двома рядами перехресно розташованих стрижнів з кроком  $30d$  (рисунок 2.8). У моделі  $d = 6\text{мм}$ , закладення стрижнів в щільний шар ґрунту ядра насипу  $0,25b$ .

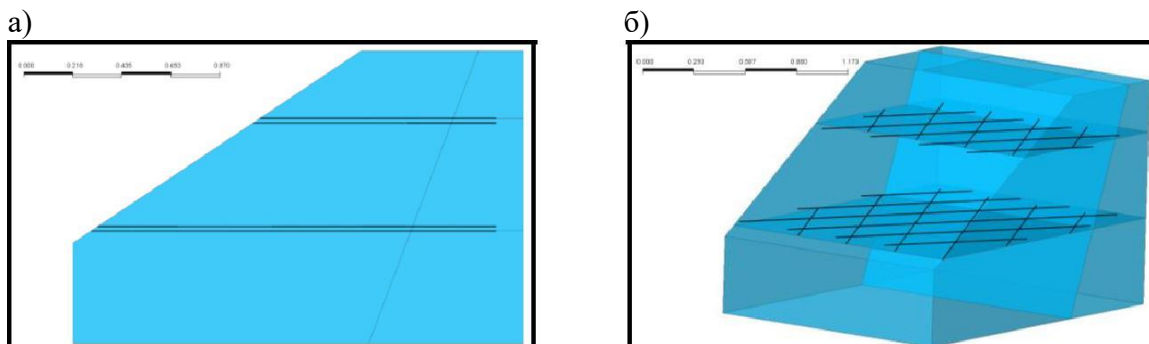


Рисунок 2.8 - Зміцнення насипу сітками стрижнів (схема 2):  
а - модель в осях X, Z; б - модель в осях X, Y, Z

3. Зміцнення ослабленої зони об'ємним багатоелементним армуванням, що складається з двох ярусів перехресно розташованих стрижнів, об'єднаних між собою масивами зміцненого ґрунту (Розташованих в кожному другому вузлі перетину стрижнів). Крок стрижнів -  $30d$ ,  $d = 6\text{мм}$ , закладення стрижнів в щільний шар ґрунту ядра насипу -  $0,25b$  (рисунок 2.9).

47

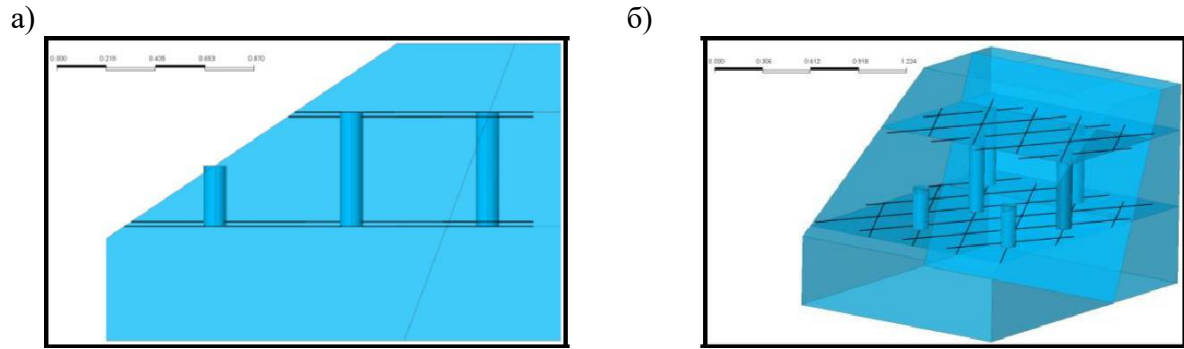


Рисунок 2.9 - Зміцнення насипу об'ємним багатоелементним армуванням (схема 3):

а - модель в осях X, Z; б - модель в осях X, Y, Z

Оскільки дана модель насипу розроблена для проведення натурних випробувань, то формування навантаження вироблено в відповідно до реальних умов. Для цього в модель введено додатковий елемент - прямокутний штамп (рисунок 2.10). Модель штампа задавалася як плоский еластичний елемент прямокутного перетину з матеріалу, робота якого описувалася модулем пружності  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ .

Навантаження на штамп передавалася з ексцентриситетом для розподілу тиску по трикутній епюрі (тобто по фактичному розподілу тиску на схилі насипу).

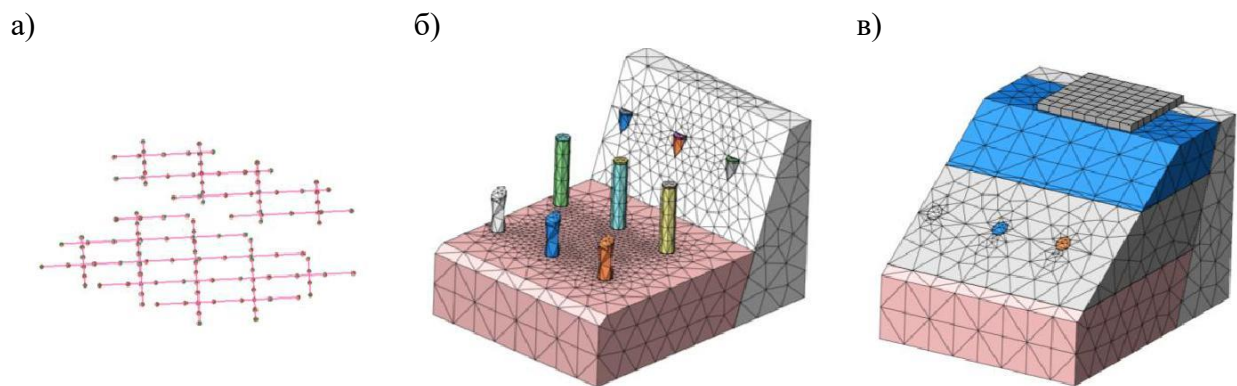


Рисунок 2.10 - Створення сітки елементів:  
а - стрижнева конструкція; б - масиви ґрунту тіла насипу і масиви зміцненого ґрунту; в - модель насипу і штампа

В складі другого блоку досліджень виконано чисельне моделювання армованої насипу при різних ґрунтових умовах.

Для проведення дослідження прийнята ефективна конструкція армування насипу, отримана при першому блоці досліджень.

Як матеріал насипу був використаний суглинок пілуватий при різних сумішах і різних ступенях ущільнення. На підставі наявних архівних даних і з використанням довідкової літератури складено блок інженерно-геологічних елементів для проведення чисельних досліджень. Значення фізико-механічних характеристик даних ґрунтів зведені в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні властивості ґрунтів

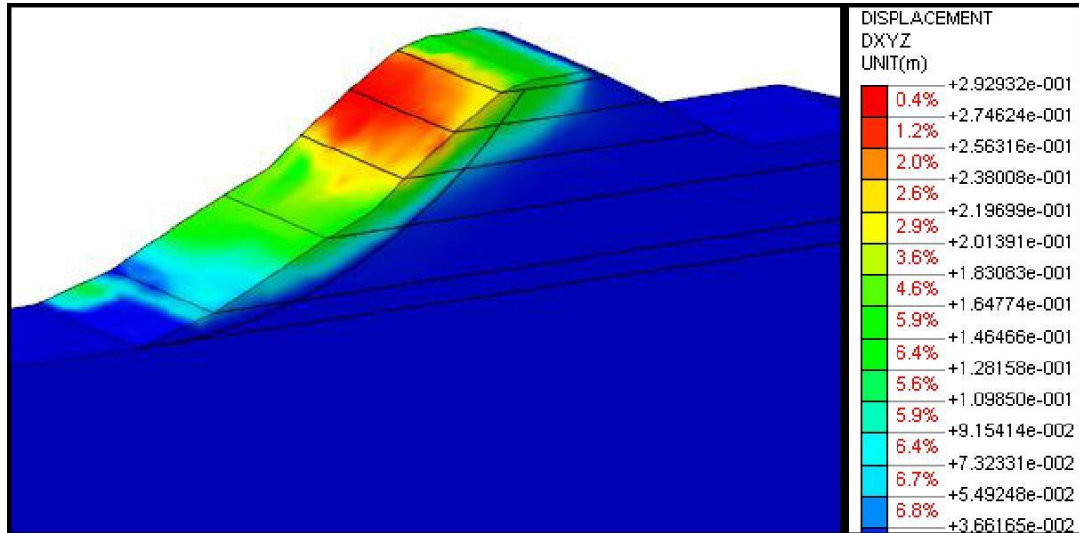
Тип ґрунту	Вологість $W, \%$	Щільність $\rho, \text{г/см}^3$	коефіцієнт пористості $e$	кут внутрішнього тертя $\varphi^0$	питомий зчеплення $c, \text{МПа}$	модуль деформації $E, \text{МПа}$
1	0,23	1,71	0,950	12	0,007	6
2	0,22	1,75	0,895	13	0,008	7
3	0,22	1,79	0,844	14	0,009	8
4	0,22	1,81	0,807	18	0,012	11
5	0,20	1,86	0,748	19	0,015	14
6	0,19	1,89	0,704	20	0,017	16
7	0,18	1,93	0,652	22	0,022	22
8	0,17	1,96	0,613	23	0,025	24
9	0,16	1,99	0,576	23	0,028	26

#### *Дослідження роботи армованої насипу*

Розрахунок, виконаний для базової моделі неармованої насипу, показав, що укіс насипу знаходиться в стані граничної рівноваги і незначне підвищення навантаження здатне спровокувати його обвалення. Як видно з рисунка 2.11, результуючий вектор деформацій насипу орієнтований в бік ослабленого укоосу.

Переміщення основної площадки насипу, з урахуванням початку зсувних переміщень, склало близько 160 мм, що є неприпустимим в умовах поточної експлуатації колії.

а)



б)

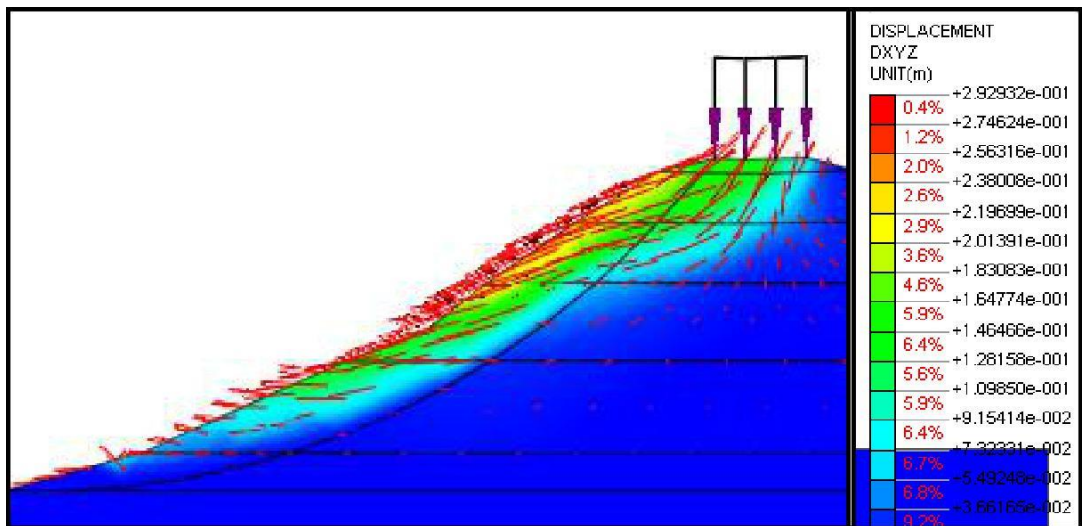


Рисунок 2.11 - Загальний вигляд деформацій неармованої насипу:  
а - в осях X, Y, Z; б - в осях X, Z

Розрахунок насипу, армованої окремими паралельно розташованими стрижнями, показав, що пристрій такої упрочнюючої конструкції дозволяє ефективно підвищувати загальну стійкість земляного полотна. Як видно з картини загальних деформацій (рисунок 2.12, а), вектор переміщень клиновидно орієнтований в напрямку ядра насипу, що говорить про достатню стійкості укосів. Напрямок максимальних зсувних зусиль показано на малюнку 2.12, б. Тут слід зазначити, що концентрація напружень відбувається в області ядра і основного майданчика насипу.

Оцінка характеру розподілу зусиль і напрямки вектора деформацій в елементах стрижневий конструкції (рисунок 2.13) показує, що основна частина напруг сконцентрована в верхньому ярусі стрижневого кріплення, при цьому нижні яруси практично виключені з роботи конструкції.

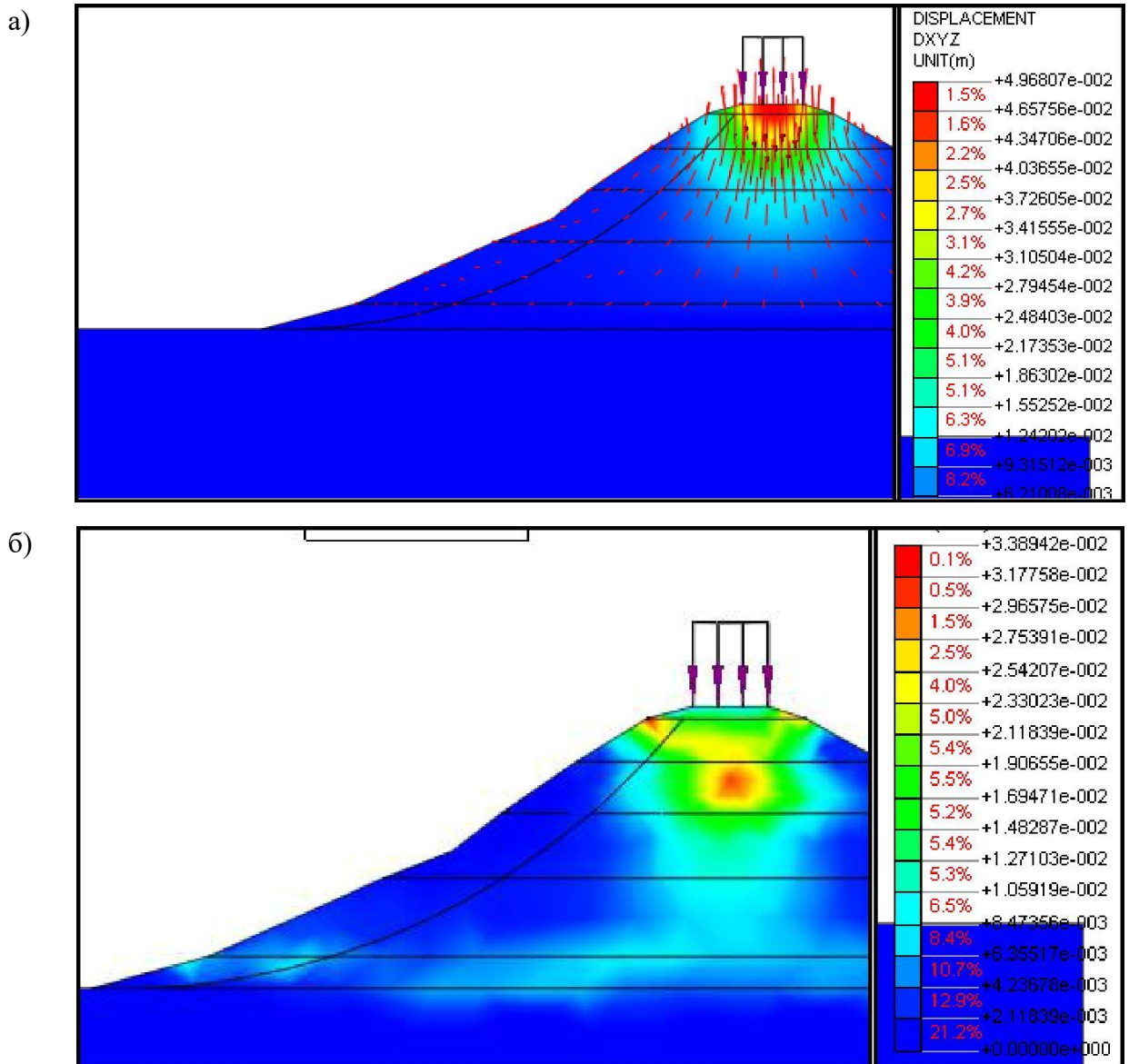


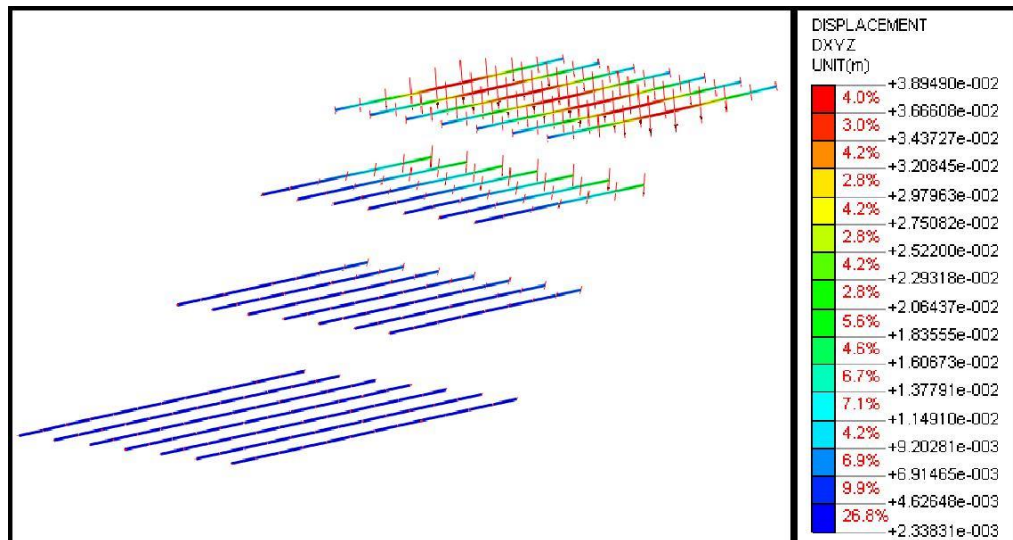
Рисунок 2.12 - Результати розрахунку насипу, армованого окремими паралельно розташованими стрижнями:

а - деформацій насипу в осях X, Z; б - розподіл напружень  $\tau_{XZ}$

Пристрій перехресно розташованих стрижнів також дозволяє виключити зсувні зрушення насипу, при цьому картина деформацій аналогічна картині, отриманої при влаштуванні окремих паралельно

розташованих стрижнів. Однак напружений стан в тілі насипу істотнозмінюється-значна частина напруг переходить в заснування споруди. Результати розрахунків вказують на то, що перехресне розташування елементів стрижневого кріплення дозволяє більш ефективно розподіляти напруження в тілі насипу (рисунок 2.14).

а)



б)

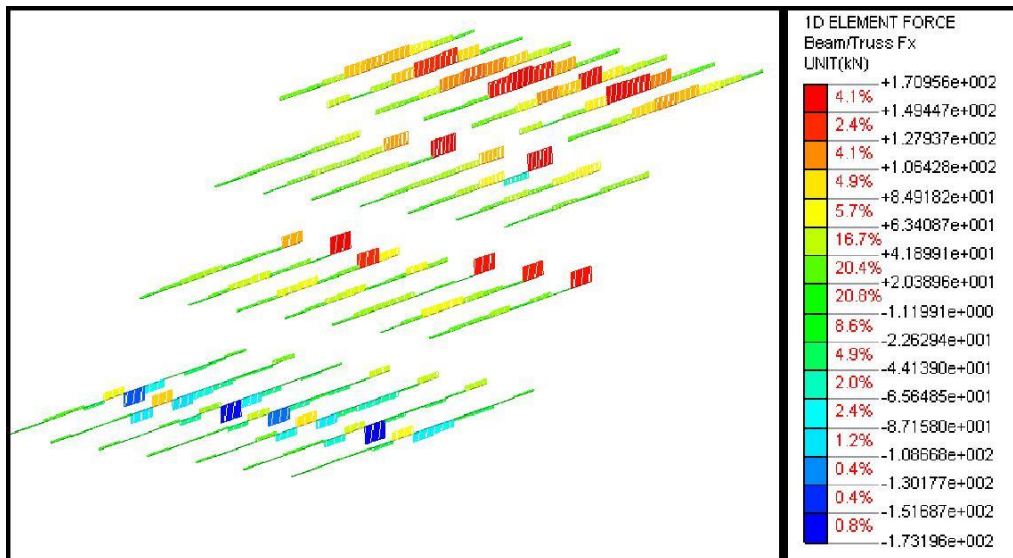


Рисунок 2.13 - Результати розрахунку елементів стрижневого кріплення:  
а - вектор розподілу деформацій в осях X, Y, Z; б - епюри розподілу зусиль в стержнях F<sub>x</sub>

а

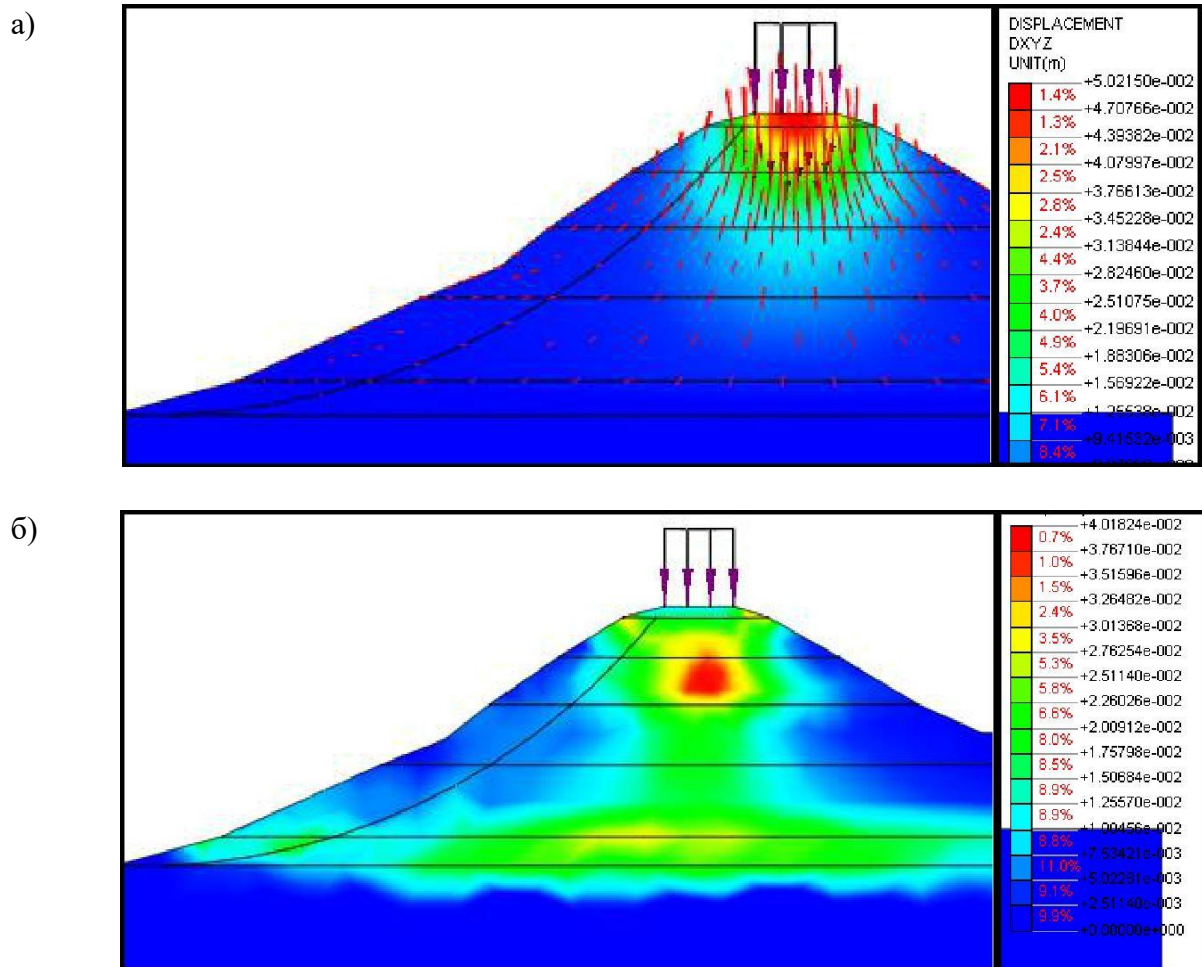


Рисунок 2.14 - Результати розрахунків насипу, армованої перехресно розташованими стрижнями:

а - загальний вид деформацій насипу (в осях X, Z); б - розподіл напружень  $\tau_{XZ}$

Загальна залежність розподілу напружень в ярусах стрижневого кріплення зберігається в порівнянні з варіантом паралельного розташування стрижнів. Відмінності спостерігаються в розподілі зусиль в окремих стрижнях конструкції - воно характеризується більш рівномірним характером, що вказує на зв'язність роботи конструкції. Дана особливість є виключно важливою в рамках розв'язуваної задачі, так як зв'язність роботи елементів стрижневого кріплення забезпечує виникнення додаткового опору конструкції сдвигаючим зусиллям (рисунок 2.15).

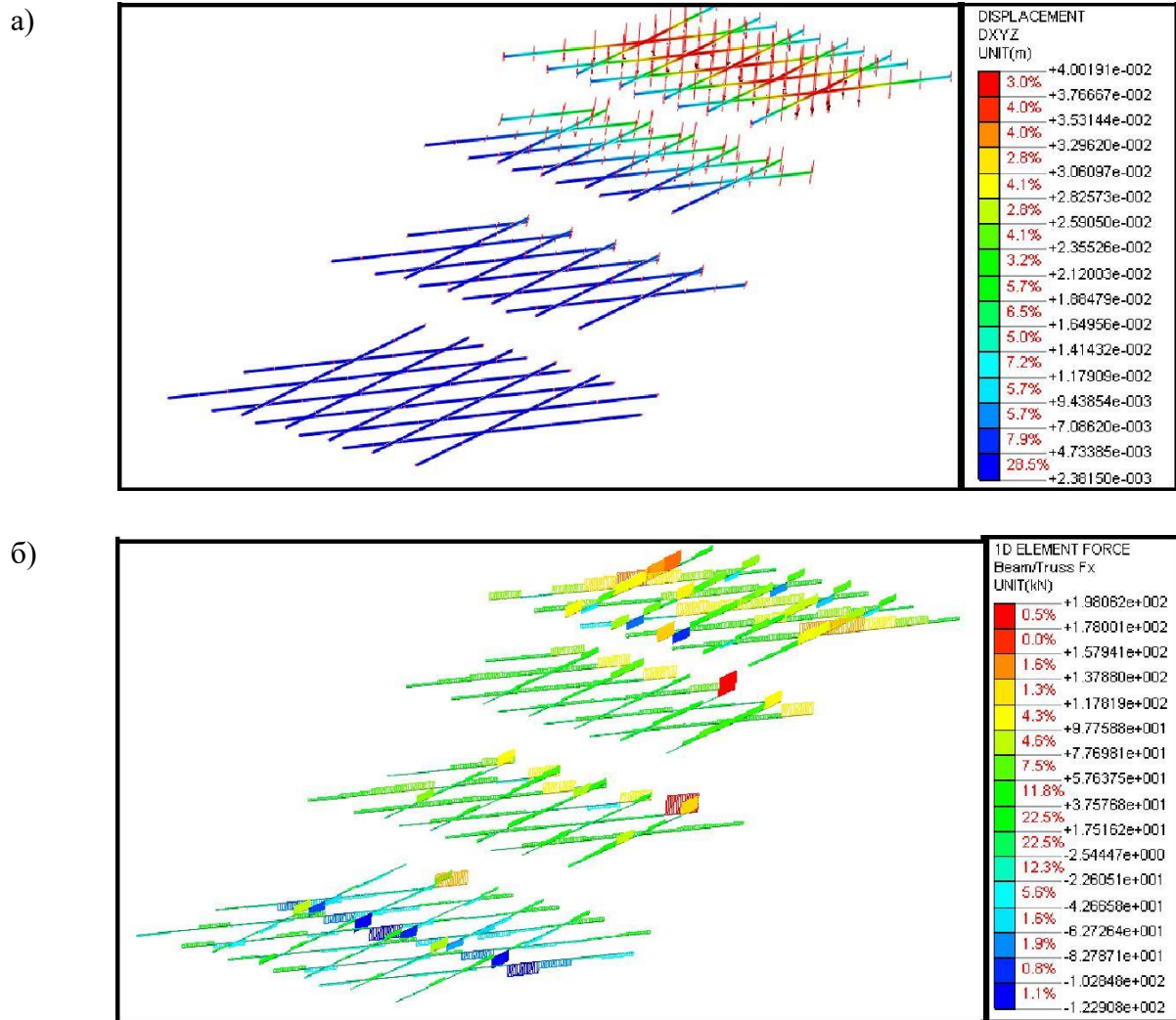


Рисунок 2.15 - Результати розрахунку елементів стрижневий конструкції:  
а - вектор розподілу деформацій в осях X, Y, Z; б - епюри  
розподілу зусиль в стержнях  $F_x$

При розрахунках насипу, армованої окремими масивами зміцненого ґрунту, прийнято розріджений розподіл точок ін'єкції розчину з причин, пов'язаних з технологічними особливостями ведення робіт. Дані особливості полягають в тому, що більш часта розстановка крапок ін'єкції може спровокувати вихід розчину в область формується поверхні обвалення укосу. Результати виконаного розрахунку показують, що загальні переміщення основної площадки насипу зменшені в середньому в два рази, в порівнянні з деформаціями неармованої моделі. Однак, оскільки масиви зміцненого ґрунту розставлені на видаленні від поверхні обвалення, істотних змін загальної

стійкості насипу не відбулося – результуючий вектор деформацій орієнтований в напрямку зрушення укосу (рисунок 2.16).

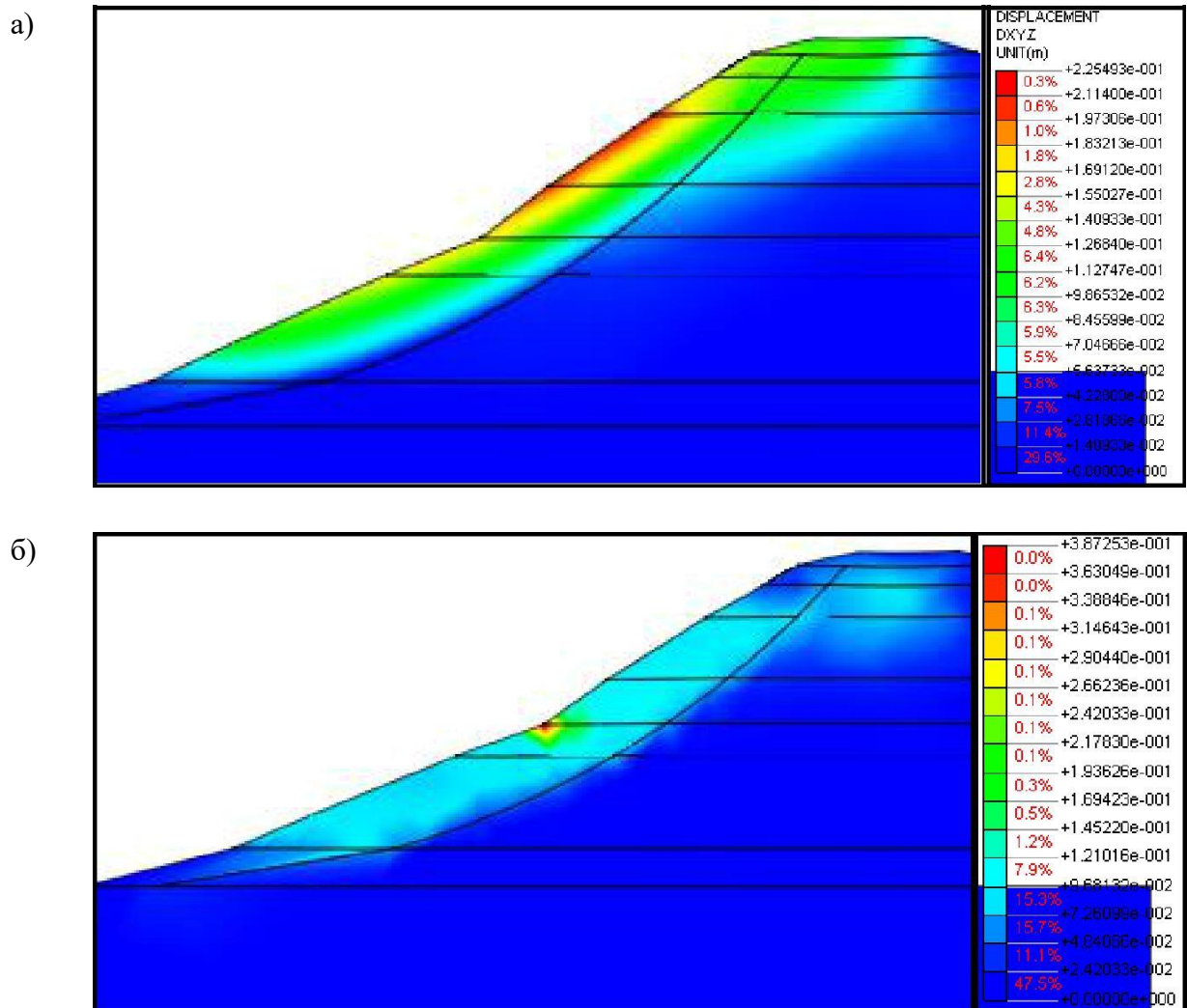


Рисунок 2.16 - Результати розрахунків насипу, армованої окремими масивами зміцненого ґрунту:

а - загальний вид деформацій насипу (в осях X, Z); б - розподіл напружень  $\tau_{XZ}$

Зміцнення земляного полотна об'ємним багатоелементним армуванням дозволило істотно зменшити деформації основної площадки насипу (середнє значення по площі становить 11 мм), при цьому напруження концентруються в області армованого масиву і практично не розвиваються в тілі земляного полотна. Це відбувається за рахунок значного розподілу зусиль по площі нижнього ярусу стрижневого кріплення (рисунок 2.17, 2.18).

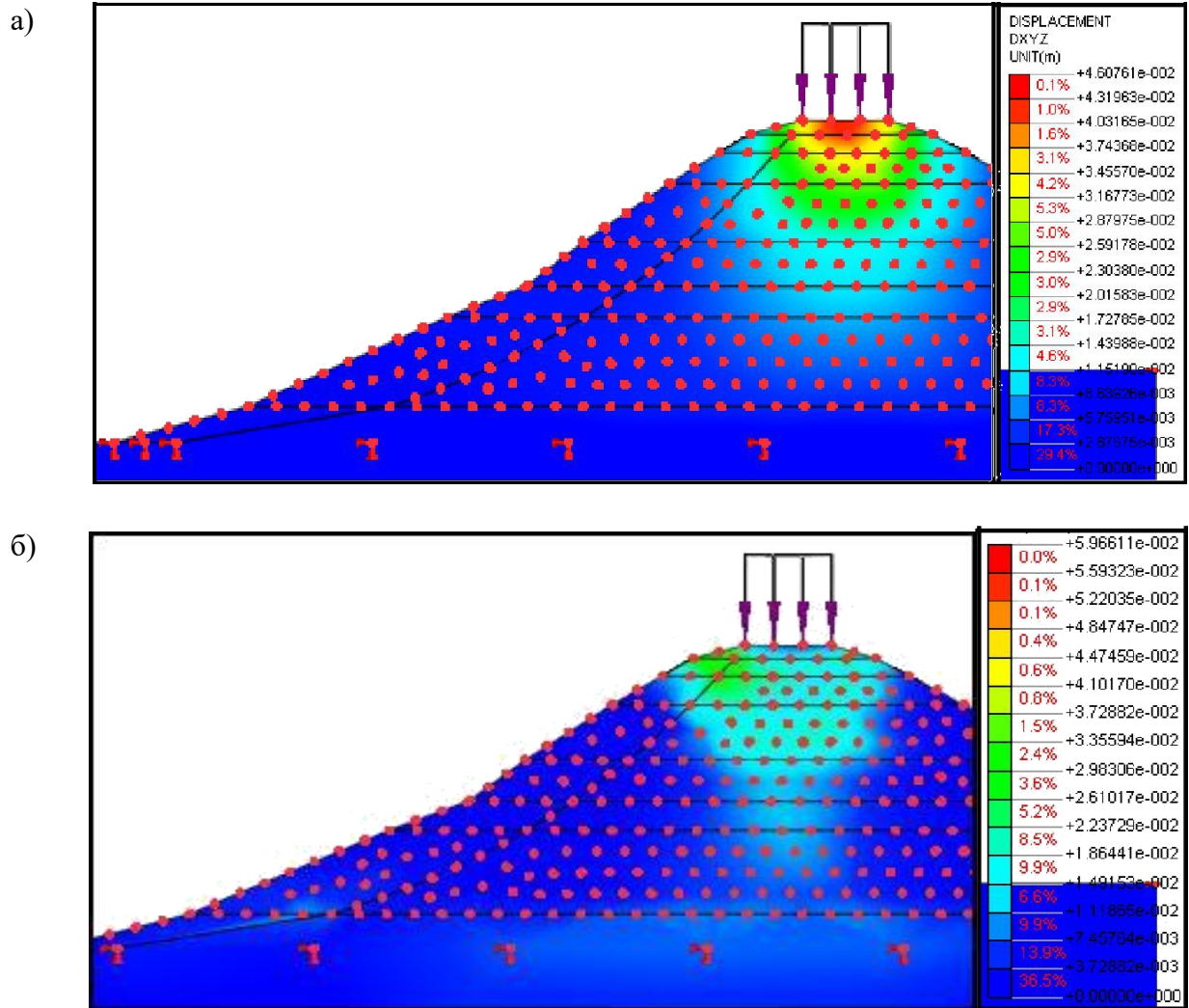


Рисунок 2.17 - Результати розрахунків насипу, зміцненої об'ємним багатоелементним армуванням:

а - загальний вид деформацій насипу (в осях X, Z); б - розподіл напружень  $\tau_{XZ}$

Аналіз розподілу напружень в елементах системи показує, що способи стрижневого і ін'єкційного зміцнення ефективно доповнюють один одного. Масиви зміцненого ґрунту надають зв'язність системі: сприймаючи навантаження від верхнього ярусу стрижнів, передають її на нижній ярус, при цьому стисливість армованого шару обмежується тільки механічними характеристиками зміцненого ґрунту. Стрижневі елементи даної системи, в свою чергу, дозволяють виконати розрідження точок ін'єкції розчину і підвищити загальну стійкість насипу.

Розрідження точок ін'єкції розчину позитивно позначається на економічному і технологічному аспекті армування земляного полотна.

С економічної точки зору зменшуються обсяги робіт по нагнітання розчину, а з технологічної - з'являється можливість видалення ін'єкцій від поверхні зрушення укосу насипу, зменшення надлишкового тиску в ґрунтовій середовищі, зниження ймовірності виходу розчину на поверхню ґрунту.

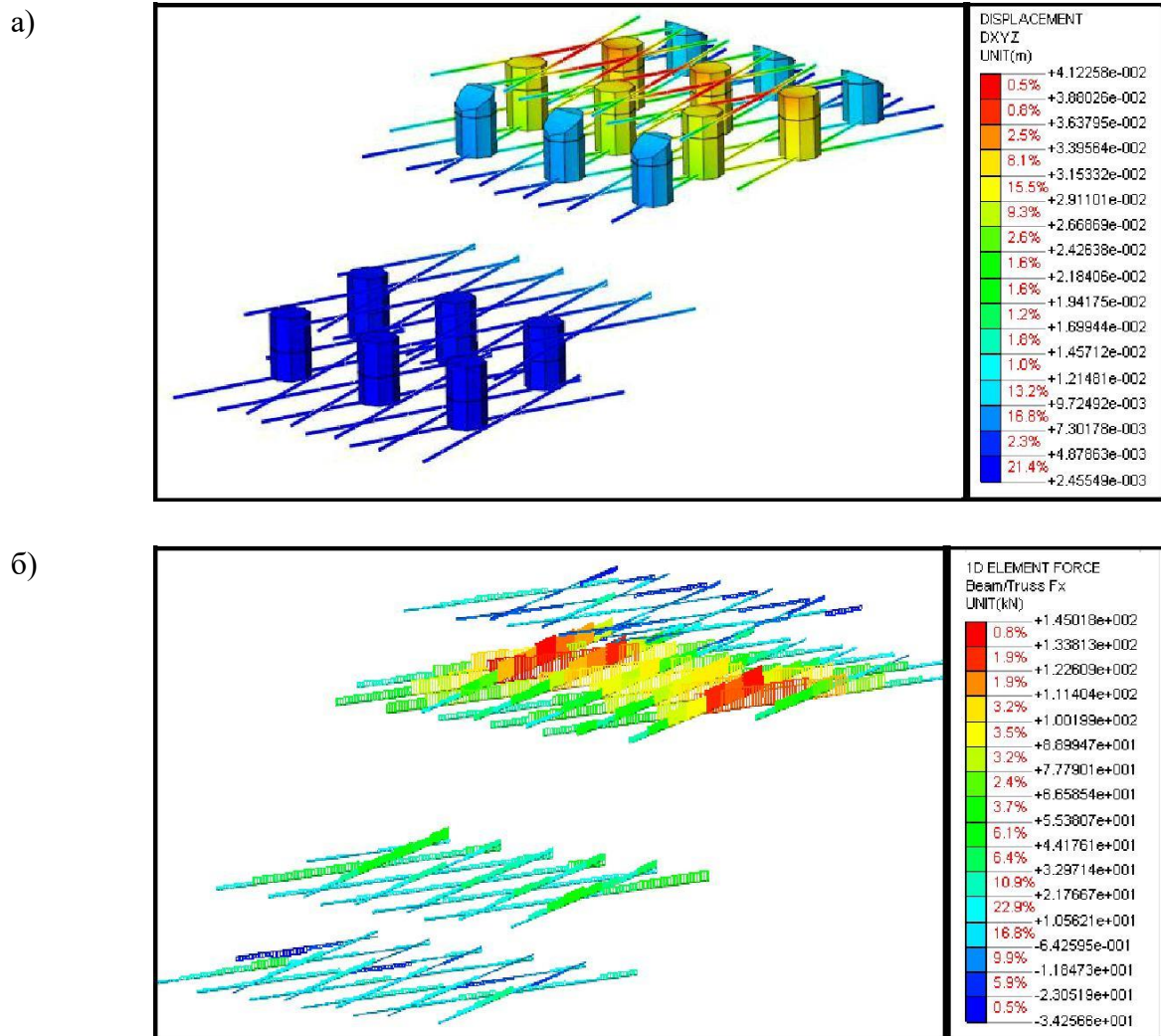


Рисунок 2.18 - Результати розрахунку об'ємного багатоеlementного армування:  
а - вектор розподілу деформацій в осях X, Y, Z; б - епюри розподілу зусиль в стержнях  $F_x$

Результати моделювання представлені зведені в таблицю 2.4. Графічне відображення опади основного майданчика в залежності від діючого навантаження представлено на рисунку 2.19. Аналізуючи отримані залежності, можна визначити межі ділянок упругопластических деформацій для кожної

моделі насипу. Значення граничних навантажень, при яких ґрунт тіла насипу здатний працювати в даній стадії (далі - «граничного тиску») наведені в таблиці 2.5. Отримані дані дозволяють оцінити ефективність застосування розглянутих варіантів армування (таблиця 2.5). Найбільш істотне збільшення навантаження спостерігається при влаштуванні перехресно розташованих стрижнів, при цьому відбувається збільшення тиску до 88% порівняно з неармованою насипом. При влаштуванні об'ємного багатoeлементного армування можливо підвищити навантаження на вісь складу до 31,2 т, що в 2 рази більше, ніж існуюча розрахункове навантаження на вісь.

Таблиця 2.4 - Результати варіантного моделювання армованих насипів

навантаження на вісь, т	тиск на Основна площадка, МПа	Осадка основної площадки, мм				
		а	б	в	г	д
3,1	0,010	1	1	1	1	1
6,2	0,020	3	3	3	3	2
9,3	0,030	7	6	5	4	3
12,5	0,040	12	10	8	6	5
15,6	0,050	19	15	12	8	7
18,7	0,060	32	24	18	11	9
21,8	0,070	59	40	30	15	11
24,9	0,080				19	14
28,0	0,090				24	17
31,2	0,100				29	20

Примітки:  
а - незміцнене насип;  
б - насип, зміцнена окремими ін'єкційними масивами;  
в - насип, зміцнена окремими паралельно розташованими стрижнями;  
г - насип, зміцнена перехресно розташованими стрижнями;  
д - насип, зміцнена об'ємним багатoeлементних армуванням.

Таблиця 2.5 - Значення граничного тиску на основному майданчику

схема зміцнення	граничне тиск, МПа	значення переміщень, мм	збільшення граничного тиску в порівнянні з неармованої насипом, раз
незміцнене насип	0,050	19	-
насип, зміцнена окремими ін'єкційними масивами	0,050	15	1,00
насип, зміцнена окремими паралельно розташованими стрижнями	0,060	18	1,20
насип, зміцнена перехресно розташованими стрижнями	0,080	19	1,60
насип, зміцнена об'ємним багатоелементних армуванням	> 0,100	20	2,00

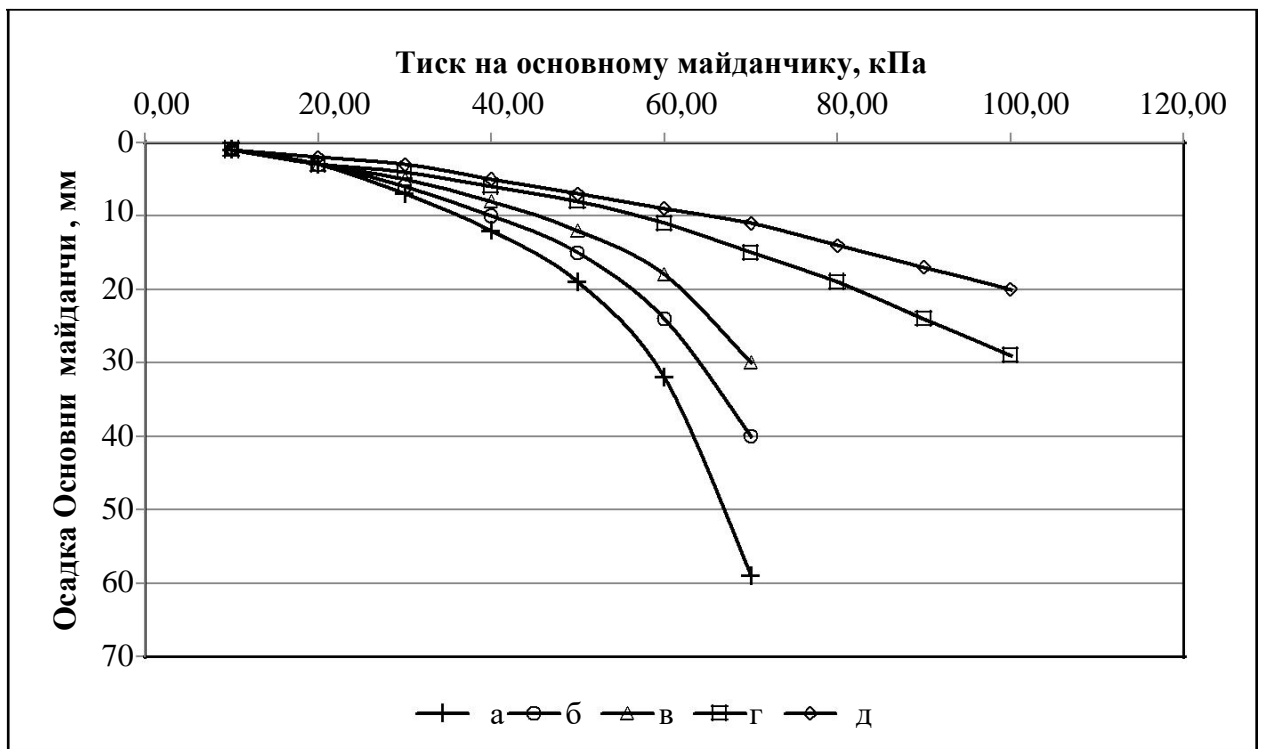


Рисунок 2.19 - Графіки осадки насипу:  
 а - незміцнене насип; б - насип, зміцнена окремими ін'єкційними масивами; в - насип, зміцнена окремими паралельно розташованими стрижнями; г - насип, зміцнена перехресно розташованими стрижнями; д - насип, зміцнена об'ємним багатоелементних армуванням

Аналіз даних досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

1. Стрижневе кріплення дозволяє підвищити стійкість укисних частин насипу за рахунок передачі частини напруг, що формуються при виникненні переміщень ґрунту, на міцне ядро насипу.

2. Найбільш ефективна робота стрижневого кріплення досягається за рахунок перехресного розташування стрижнів, при цьому відбувається більш рівномірний розподіл напружень в системі, виникає додатковий опір прорізування ґрунту в вузлах перетину стрижнів, виникає ефект защемлення ґрунту.

3. Введення в стрижневу конструкцію масивів зміцненого ґрунту дозволяє отримати якісно нову систему, що дозволяє максимально ефективно розподіляти напруги в тілі насипу.

4. Створення об'ємного багатoeлементного армування в укисної частини насипу дозволяє виключити деформації зсуву і обмежити переміщення вертикальної площиною.

*Дослідження роботи об'ємного багатoeлементного армування в різних інженерно-геологічних умовах*

Розрахунки моделі насипу виконувалися при варіаційном зміні параметрів ґрунту (див. Таблицю 2.3). При цьому функцією відгуку були значення абсолютного і відносного деформування системи (рисунок 2.20). Результати розрахунків представлені в таблиці 2.6.

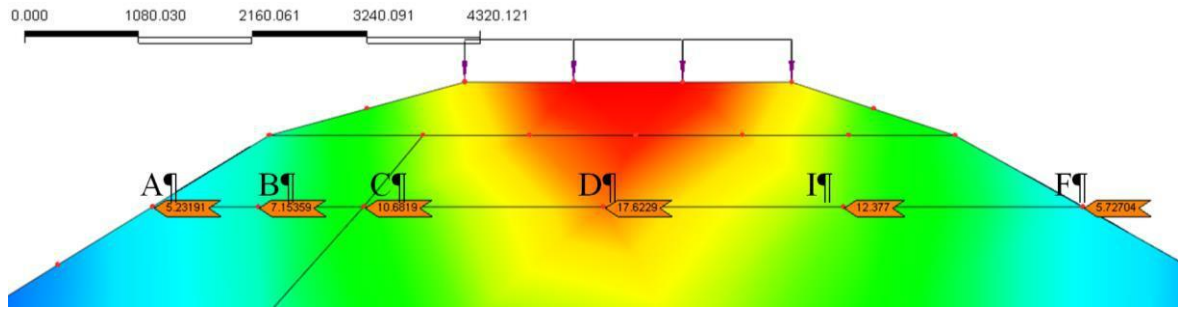


Рисунок 2.20 - Схема розміщення контрольних точок

Таблиця 2.6 - Результати розрахунків об'ємного багатоеlementного армування в різних інженерно-геологічних умовах

Тип ґрунту насипу	Переміщення контрольних точок, мм						відносна деформація армованого масиву $\epsilon$ , Д.Є.
	A	B	C	D	I	F	
1	28,27	39,16	62,28	96,04	67,89	29,58	0,100
2	21,30	28,88	44,65	68,81	49,42	20,16	0,094
3	17,73	23,69	36,18	55,93	40,77	17,80	0,081
4	12,64	16,89	24,67	39,07	28,84	13,96	0,061
5	9,90	13,34	19,48	31,22	22,74	10,32	0,050
6	8,63	11,69	17,09	27,60	19,95	9,43	0,045
7	6,18	8,45	12,63	20,61	14,61	6,69	0,035
8	5,67	7,75	11,54	18,99	13,39	6,17	0,033
9	5,23	7,15	10,68	17,62	12,38	5,86	0,030

Значення переміщень контрольних точок містять в собі інформацію про деформацію насипу в цілому, тобто враховують як ефект зміцнення, так і зміни параметрів ґрунтового середовища. Графіки переміщень контрольних точок представлені на рисунку 2.21.

Вивчення даних про деформацію насипу при зміні ґрунтових умов ослабленою зони показало, що при використанні об'ємного багатоеlementного армування зміни характеристик ослабленої зони не знаходять відображення в загальних деформаціях насипу (розкид деформацій знаходиться в межах 5%, без певного тренда їх зміни). Даний факт пояснюється тим, що система працює як пружний прошарок в тілі насипу і, сприймаючи тиск від верхніх шарів ґрунту, передає його через масиви зміцненого ґрунту на нижню межу зміцненого шару, в зв'язку з чим слабкий

грунт, затиснений між зміцненими масивами, практично не включається в роботу насипу.

Однак подальше дослідження роботи насипу показало, що істотний вплив на роботу конструкції надають характеристики ґрунту, що складає область насипу, пов'язану з ослабленою зоною, в яку здійснюється закладення. Аналізуючи отримані значення переміщень, можна сказати, що робота системи буде забезпечена в разі, якщо шари ґрунту, в які здійснюється закладення, будуть представлені пилуватими суглинками, що знаходяться в стані від твердої до тугопластичної консистенції. Дані шари ґрунту повинні володіти наступними показниками механічних характеристик: модуль деформації  $E$  - не менше 11 МПа, питоме зчеплення ґрунту  $z$  - не менше 0,012 МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi$  - не менше  $18^0$ . Однак слід зазначити, що пристрій об'ємного багатоелементного армування можливо також в ґрунтах з більш низькими характеристиками. Для цього слід передбачати додаткові роботи по зміцненню ґрунту в зоні загортання каркаса. Дані роботи повинні полягати в нагнітанні додаткового обсягу розчину в ґрунт, пов'язаний з ослабленою зоною насипу, для досягнення нею необхідних мінімальних характеристик. Призначення обсягів робіт в цьому випадку слід проводити відповідно до існуючих методик.

Значення відносної деформації зміцненого шару дозволяє оцінити величину залишкових деформацій після влаштування об'ємного багатоелементного армування, ґрунтуючись на даних про стан зміцнюючих ґрунтів.

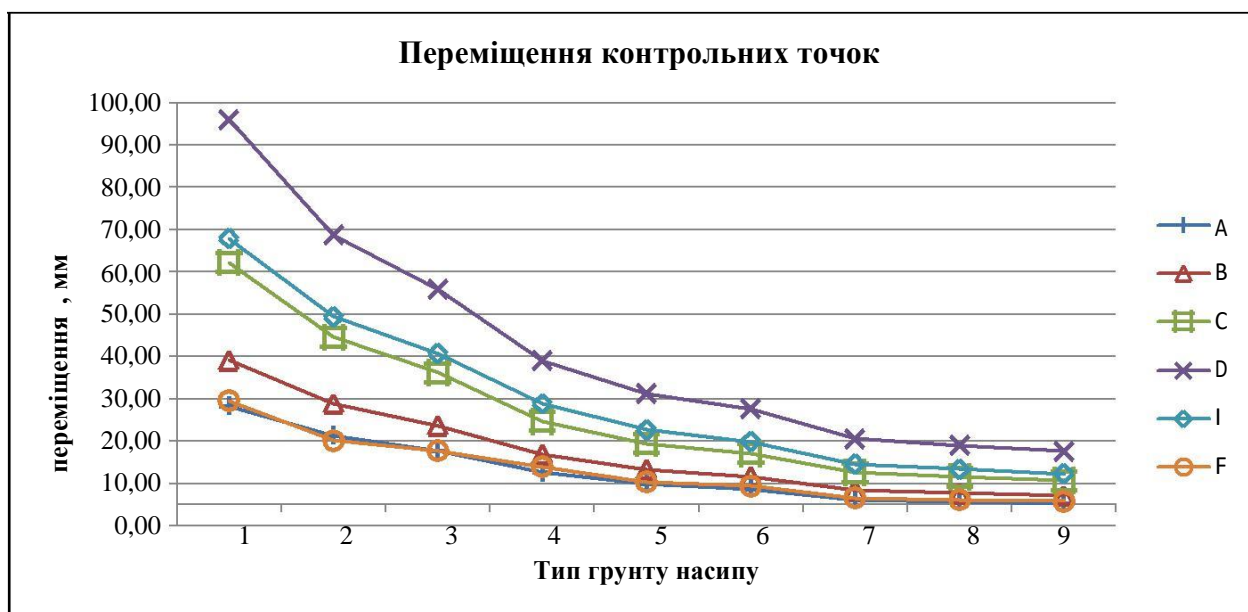


Рисунок 2.21 - Графіки переміщень контрольних точок

### Висновки до розділу 2

Дослідження роботи армуючих конструкцій з використанням методів чисельного моделювання дозволили сформулювати роботу різних армуючих конструкцій, які використовуються при проектуванні зміцнення насипів, встановити залежності між схемою армування і характером деформування насипу, визначити граничні умови застосування розроблювального способу. На підставі отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- Найбільш істотне збільшення граничного тиску на основну площадку насипу спостерігається при влаштуванні об'ємного багатоелементного армування, при цьому відбувається збільшення тиску в 2 рази в порівнянні з незміцненою конструкцією. Це дозволяє підвищити навантаження на вісь рухомого складу.

- Застосування методу можливе за умови заглиблення елементів армування в міцні шари ґрунту, представлені пилуватими суглинками, що знаходяться в стані від твердої до тугопластичної консистенції. Міцні шари ґрунту повинні володіти наступними показниками механічних характеристик: модуль деформації  $E$  - не менше 11 МПа, питоме зчеплення ґрунту  $z$  - не менше 0,012 МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi$  - не менше  $18^{\circ}$ .

- Застосування об'ємного багатоелементного армування можливо в грунтах з більш низькими характеристиками за умови додаткового опрацювання ґрунту напірної ін'єкцією, аж до досягнення необхідних значень показників міцності служать основою для проектування зміцнення земляного полотна об'ємним багатоелементним армуванням.

- Середня лінія графіків дозволяє виділити найбільш раціональне поєднання параметрів армування. При цьому слід розрізняти раціональне поєднання параметрів армування в разі підвищення стійкості і зменшення стисливості. У першому випадку раціональне поєднання параметрів встановлюється при 0,65b, 32d і в кожному третьому вузлі ін'єктування розчину, а в другому випадку - при 0,45b, 40d і також в кожному третьому вузлі ін'єктування розчину.

### 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА СПОСІБ ЗМІЦНЕННЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

*Проектування зміцнення земляного полотна способом об'ємного багатоелементного армування*

Проектування виконується з використанням сучасних методів розрахунку анізотропних середовищ, в сукупності з удосконаленими методами чисельного і натурного моделювання роботи армуючих конструкцій, стосовно проблематики розв'язуваної задачі по зміцненню експлуатованої насипу.

Способу зміцнення спрямований на створення нової конструкції в тілі реконструюється земляного полотна без порушення його цілісності і враховує особливості експлуатації інженерної споруди, а також характер формування і розвитку дефекту, що дозволяє проводити роботи безпечними методами з отриманням результату високої якості.

На стадії передпроектних робіт повинні бути сформовані наступні початкові дані:

- геодезична основа у вигляді поздовжнього і поперечних профілів земляного полотна, а також топографічна зйомка місцевості;
- інженерно-геологічний розріз ділянки, що включає дані по будові баластної призми, тіла земляного полотна та його основа;
- фізико-механічні характеристики ґрунтів земляного полотна;
- тип рухомого складу і вантажонапруженість ділянки.

Матеріали інженерно-геологічного обстеження повинні також включати дані детального вивчення зон локалізації баластних заглиблень і ослаблених зон, що дозволяють охарактеризувати ступінь і напрямок їх розвитку, наявність обводнення.

На підставі отриманих даних вибудовується розрахункова модель в і розраховується напружено-деформований стан земляного полотна. При цьому розрахунки проводяться з використанням модуля об'ємного моделювання. Стрижневе кріплення слід виконувати еластичними лінійними елементами

круглого поперечного перерізу, модельованими ізотропним матеріалом, що характеризується модулем пружності  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ . Побудова ґрунтового середовища слід здійснювати на базі моделі ідеально пластичної середовища Кулона-Мора, що використовує основні параметри пластичності, - питоме зчеплення  $c$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , коефіцієнт ділатансії  $\psi$ , модуль Юнга  $E$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ . Формування навантаження виконується з використанням модуля «construction stage».

Отримані в ході розрахунків дані служать для аналізу фактичного стану земляного полотна, що необхідно для визначення напрямку подальшого розвитку деформацій, побудови поверхні обвалення укосу і встановлення величини стиснення ослаблених зон. На покрівлі ослаблених зон і баластних заглиблень визначаються значення фактично діючих напружень.

Підбір основних параметрів зміцнення допускається виконувати з використанням класичних методів розрахунку земляного полотна, наприклад, таких, як розрахунок стійкості укосу по круглоциліндричній поверхні зрушення.

В цьому випадку попередньо виконується розрахунок стійкості укосу з побудовою епюри наростання нормальної складової напружень на схилі. Далі, керуючись значеннями діючих напружень, з використанням закономірностей, підбираються основні параметри армування для першого ступеня закріплення і виконується повторний розрахунок епюри наростання напружень, з урахуванням того, що близько 20% напружень переходять в нижні шари насипу (див. рисунок 3.1, б). Аналогічно проводиться підбір параметрів другого ступеня армування (рисунок 3.2, в).

Основні параметри армування служать для вибору залежних параметрів. Нижче представлений повний перелік параметрів, що визначають роботу системи об'ємного багатоелементного армування.

*Основні параметри:*

- кількість каркасів і їх положення в поперечному перерізі насипу;
- глибина закладення елементів армування в міцний масив ґрунту;
- крок розстановки стрижнів;
- кількість точок ін'єкції розчину.

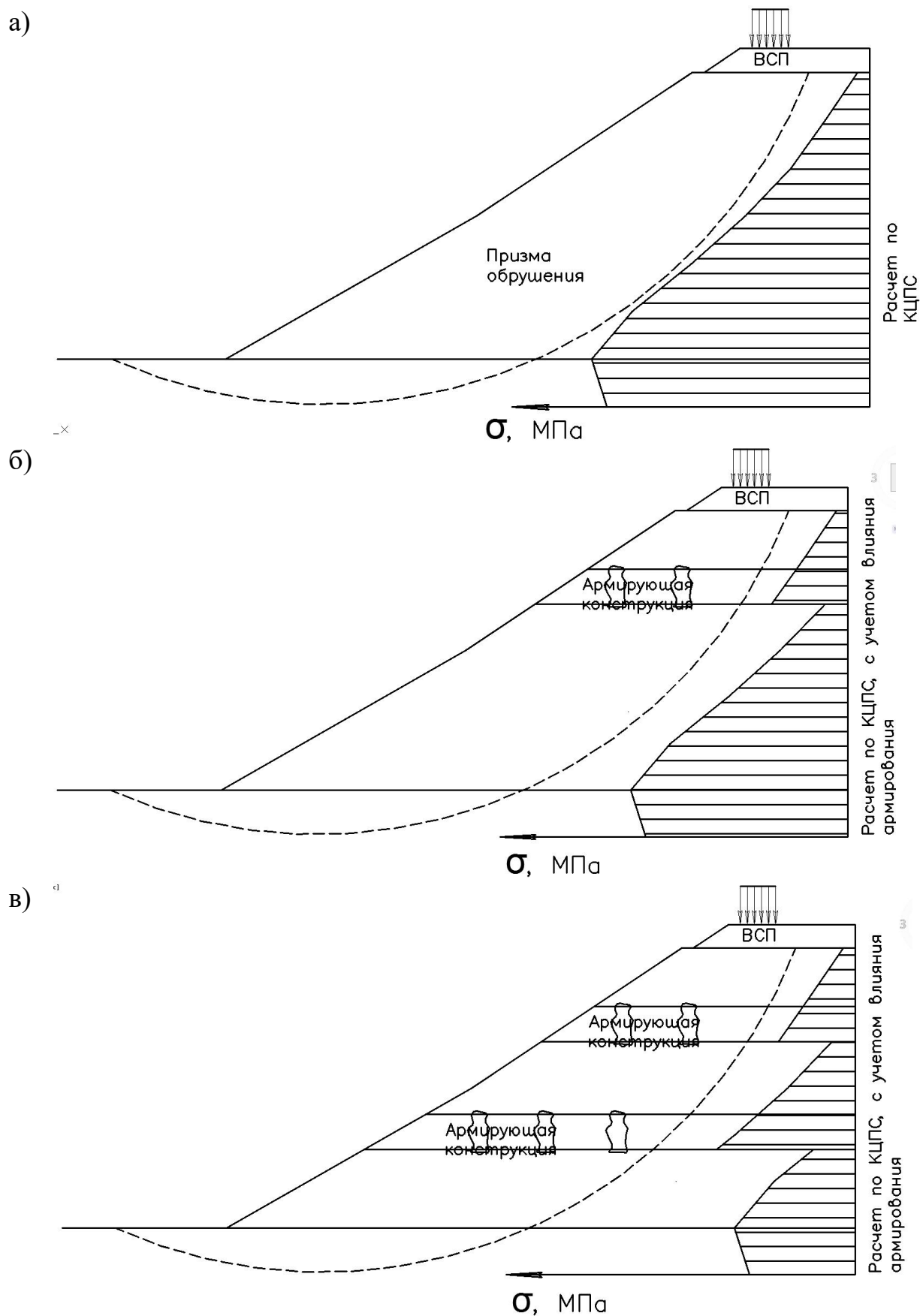


Рисунок 3.2 - Підбір основних параметрів армування при розрахунку по круглоциліндричній поверхні обвалення укосу:

- а - розрахунок без урахування армування; б - розрахунок з першим рівнем армування; в - розрахунок з другим рівнем армування

*Зовсім параметри:*

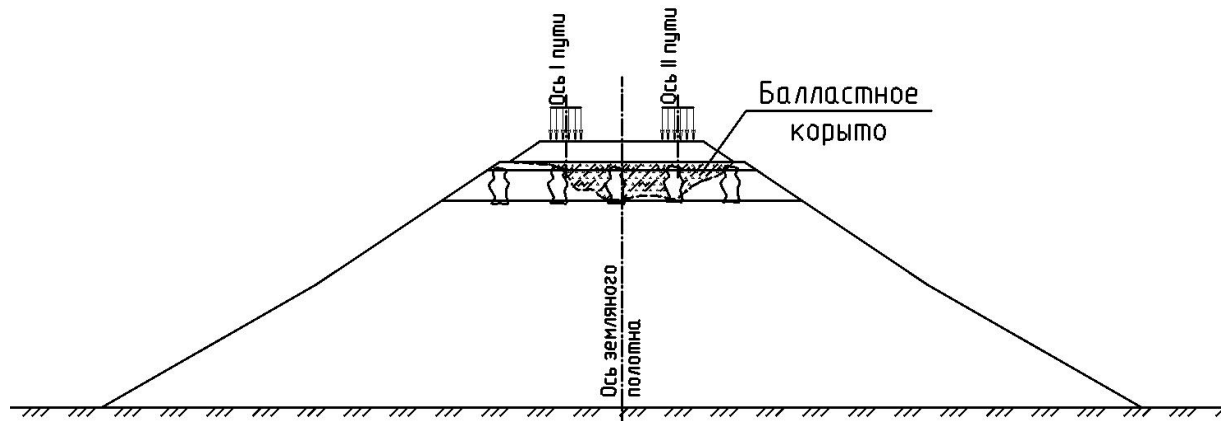
- довжина стержня  $l_c$  ;
- діаметр стрижня  $d_c$ ;
- кут забивання стержня в горизонтальній площині щодо лінії укосу споруди  $\alpha$  ;
- відстань по вертикалі між рядами стрижнів  $S$ ;
- відстань між каркасами у вертикальній площині  $S'$  ;
- місця розташування і глибина трубчастих дренажів;
- обсяг зміцнюваного ґрунту  $V_{\text{зак}}$  ;
- обсяг і рецептура твердіє розчину  $V_{\text{раст}}$  ;
- робочий тиск ін'єкції  $P$  і критерії «відмови».

Кількість каркасів і їх положення в поперечному перерізі насипу визначаються дефіцитом несучої здатності ґрунтів і положенням зон ослаблення. На малюнку 4.3 наведено приклад можливих варіантів розташування армуючих елементів.

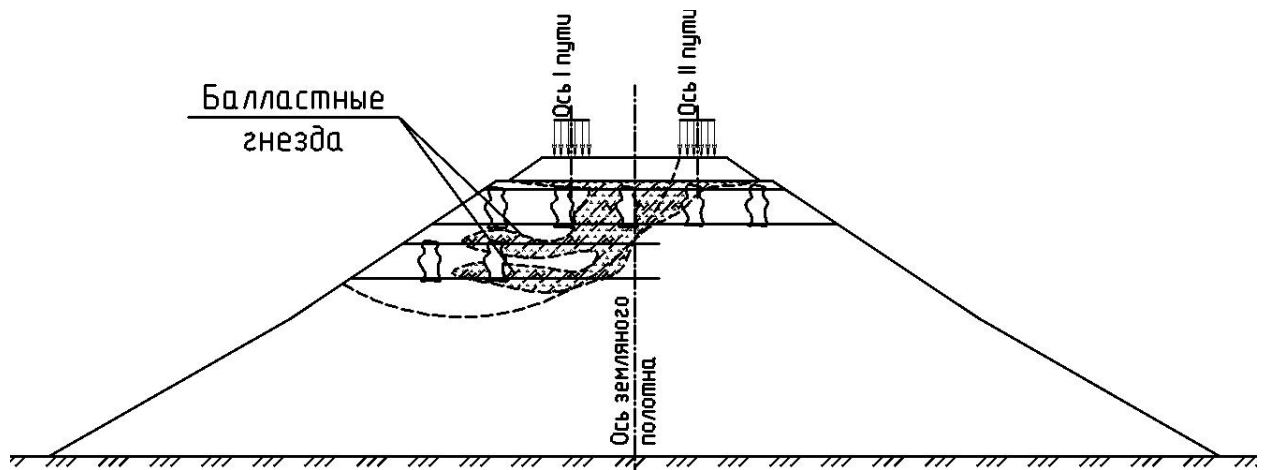
Зовсім параметри розраховуються з урахуванням основних параметрів об'ємного багатоелементного армування і фізичних характеристик ґрунту.

Довжина стрижня призначається залежно від характеру і місця розташування дефекту, а також від наявності необхідності поверхневого кріплення укосу. Нижче наведені можливі варіанти визначення довжини стрижня.

а)



б)



в)

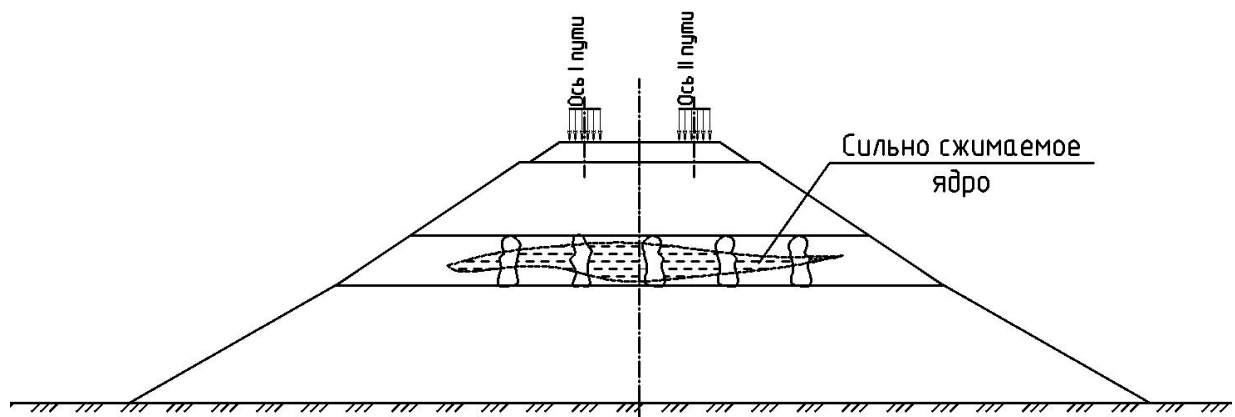


Рисунок 3.2 - Возможные варианты розташування армуючих елементів:  
 а - підвищення стабільності основного майданчика б - підвищення стійкості укосів в - зменшення стисливості ядра насипу

*А. Дефект знаходиться в ядрі насипу, при цьому його розташування або обсяг ослабленою зони не дозволяє опрацювати його з одного боку споруди. Забивання стержнів проводиться з двох сторін з перекриттям не менше 1 м.*

*Б. Дефект знаходиться в укiснiй частини споруди або поширюється в сторону на глибину, що дозволяє опрацювати його з одного боку. У цьому випадку глибина забивання стержня в мiцнiй масив ґрунту призначається залежно вiд горизонтальної проекції контуру ослабленою зони, але не менше 1 м. У разі, якщо глибина розташування поверхні ослаблення більше 2 м, довжина стержня визначається за формулою*

Діаметр стержня визначається на основі залежності між кроком і діаметром, отриманої за графіками, при цьому рекомендується прийняти діаметр стержня рівним 30 мм.

Кут забивання стержня в горизонтальній площині щодо лінії укосу споруди повинен забезпечувати створення в горизонтальній площині осередків решітки.

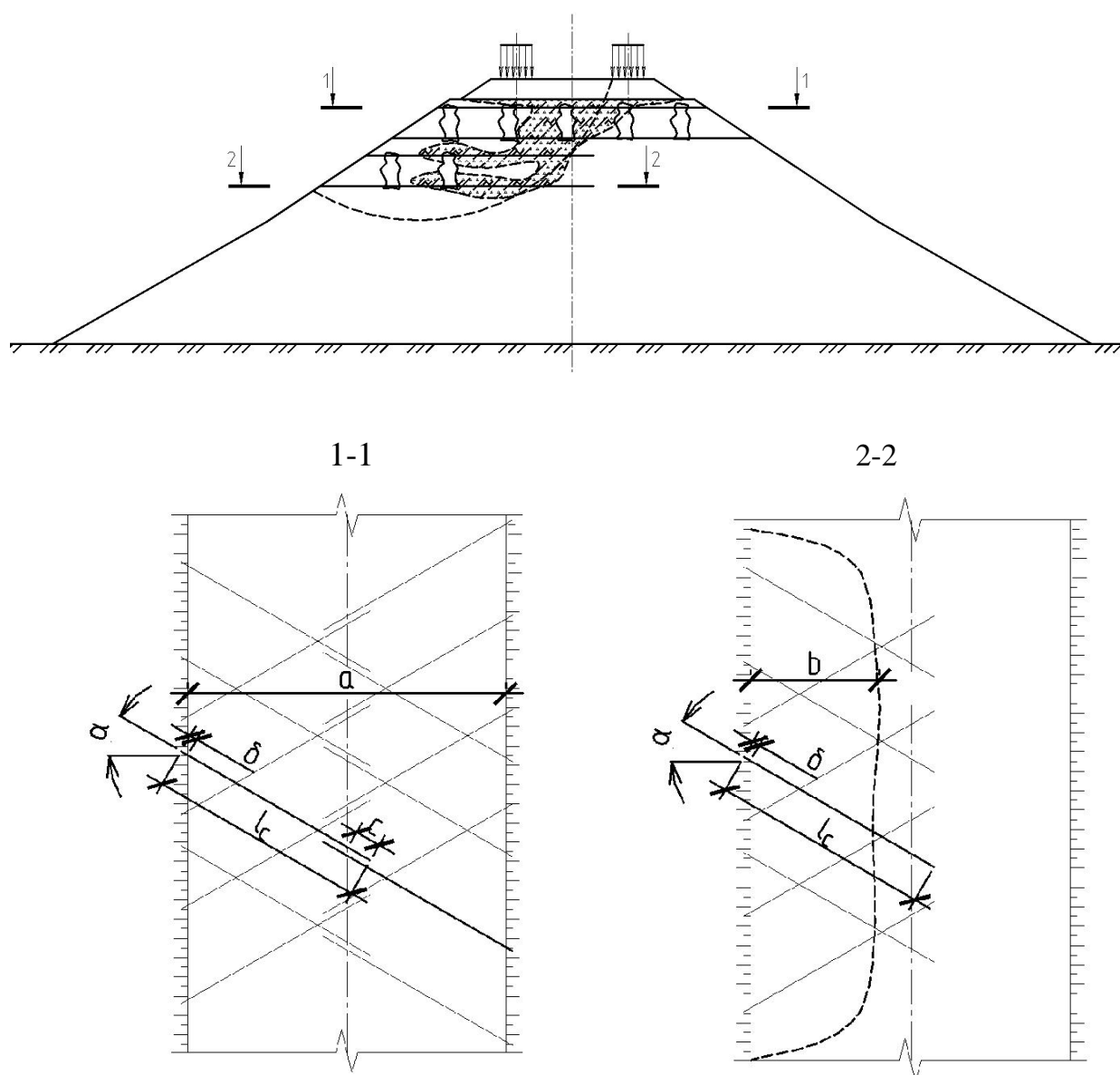


Рисунок 3.3 - Схема до визначення довжини стрижнів, що занурюються з одного боку земляного полотна, при глибині ослабленою зони більше 2 м

Точки ін'єкції для розчину, в разі нагнітання через окремі ін'єктори, що занурюються з укосу, призначатись за умови об'єднання вузлів перетину стрижнів масивами зміцненого ґрунту.

Обсяг зміцнюваного ґрунту визначається, виходячи з умови об'єднання сіток стрижнів в один каркас. Обсяг ґрунту, зміцнюваного однією ін'єкцією, розраховується за формулою

Обсяг твердіє розчину, необхідний для зміцнення проектного обсягу ґрунту або осушення обводненої зони земляного полотна, визначається з умови зменшення порового простору ґрунту за формулою

Допускається визначати обсяг ін'єкції розчину з умови зниження вологості (переходу ґрунту в стан більш твердої консистенції) внаслідок віджимання парової води за формулою

Рецептура твердіє розчину призначається таким чином: одна частина - це в'язучий типу портландцементу, чотири частини - супіщаний ґрунт або суміш піску і глини. Рецептатура призначається проектною документацією в залежності від числа пластичності глинистого ґрунту і уточнюється за місцем виконання робіт в ході дослідно-виробничої закачування.

Робочий тиск ін'єкції рекомендується встановлювати в межах 0,5 МПа, однак воно не повинно перевищувати 70% від тиску, при якому відбувається вилив твердіє розчину на денну поверхню земляного полотна. Максимальний тиск встановлюється також в ході дослідно-виробничої закачування.

Рухливість розчину повинна забезпечити його безперешкодне проходження по ін'єкційним стержнів і ін'єкторами. рухливість розчину обумовлюється водоцементним співвідношенням, складом суміші і використовуваними пластифікуючими добавками і повинна визначатися при пробному ін'єктованість. Беручи до уваги наявні дослідження в цьому напрямку [96], підбір компонентів слід проводити таким чином, щоб була забезпечена осаду стандартного конус 15 см.

За критерії відмови слід приймати в першу чергу:

- поглинання ґрунтом проектного обсягу твердіє розчину;
- підвищення тиску вище максимально встановленого проектом;
- вилив розчину на поверхню.

Після призначення всіх параметрів армування на основі даних про геометричні параметри споруди, інженерно-геологічну будову тіла основи споруди виконується розрахунок насипу, зміцненої об'ємним багатоелементних армуванням. При цьому проводиться перевірка граничних значень деформацій конструкції і коефіцієнта надійності споруди і робиться висновок про достатність прийнятих параметрів армування. У разі, якщо коефіцієнт надійності споруди перевищує нормативне значення

більш ніж на 15%, слід виконати оптимізацію системи за рахунок розрідження кроку розстановки стрижнів, зменшення діаметра стрижнів або зменшення числа точок ін'єкції розчину.

### *Зміцнення насипу об'ємним багатoeлементних армуванням*

Вибір методу пристрою системи об'ємного багатoeлементного армування в першу чергу залежить від характеру деформування і наявності обводнених зон в тілі земляного полотна. Як показано в розділі 1, причиною деформацій земляного полотна, як правило, є перезволоження ґрунтів.

В зв'язку з цим реалізацію способу зміцнення обводнених зон земляного полотна слід проводити в поєднанні з пристроєм трубчастих дренажів.

При цьому пристрій стрижневий частини об'ємного багатoeлементного армування виконується до початку монтажу трубчастих дренажів. Після влаштування дренажів здійснюється спрямоване видалення води з земляного полотна через дренажні свердловини шляхом нагнітання твердіє розчину.

Реалізація способу можлива із застосуванням двох методик нагнітання твердіє розчину в вузли перетину стрижнів. Перша методика полягає в нагнітанні розчину через ін'єктори, які добувають із земляного полотна після закінчення робіт. Друга методика полягає в нагнітанні розчину через ін'єкційні стрижні. Вибір методики нагнітання розчину залежить від місця локалізації дефекту насипу, при цьому, оскільки основною умовою є нагнітання розчину в вузли перетину стрижнів, прийнята методика повинна забезпечувати виконання цієї вимоги.

Використання видобутих ін'єкторів доцільно при глибині їх забивання не більше 3,0 м, це обґрунтовується тим, що при допустимому куті відхилення ін'єктора в  $5^{\circ}$  відбувається зміщення його нижнього кінця на величину 260 мм, що відповідає половині радіуса зміцнення ін'єкції. Дана величина відхилення не забезпечить проектного положення масиву зміцненого ґрунту. Однак при незначних глибинах забивання ін'єкторів дана методика дозволяє в значній мірі збільшити швидкість виконання робіт, оскільки роботи з забивання стрижнів і нагнітання розчину ведуться паралельно.

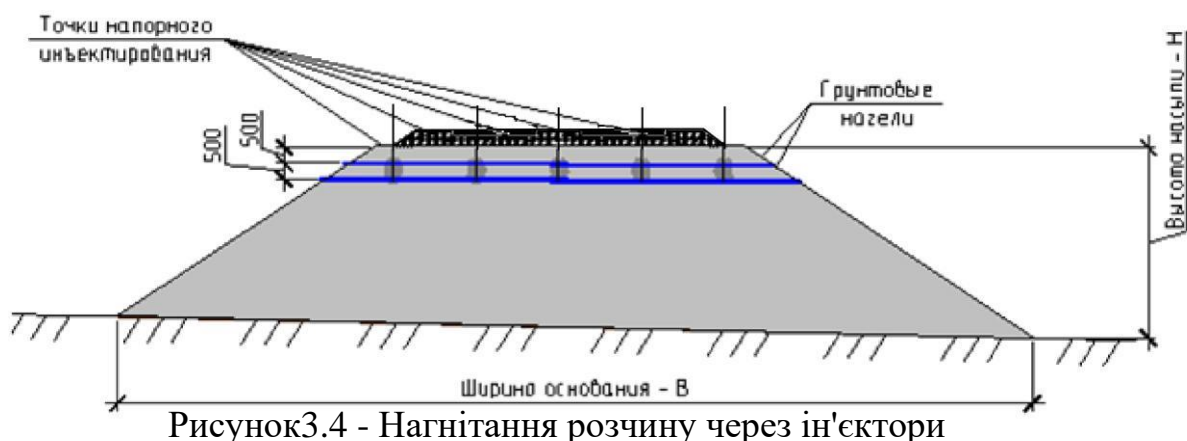


Рисунок 3.4 - Нагнітання розчину через ін'єктори

Реалізація даної методики виконується в послідовності, що дозволяє забезпечити стійкість укісних частин на час, необхідний для монтажу елементів армування, і час твердіння розчину. У зв'язку з цим першу чергу виконується пристрій стрижневий частини системи шляхом занурення окремих стрижнів з укісної частини земляного полотна гідропневматичне устаткування ПУМ-65. При цьому для забезпечення проектного кута забивання на схилі насипу попередньо виконується монтаж стартового пристрою (див. Рисунок 3.5).

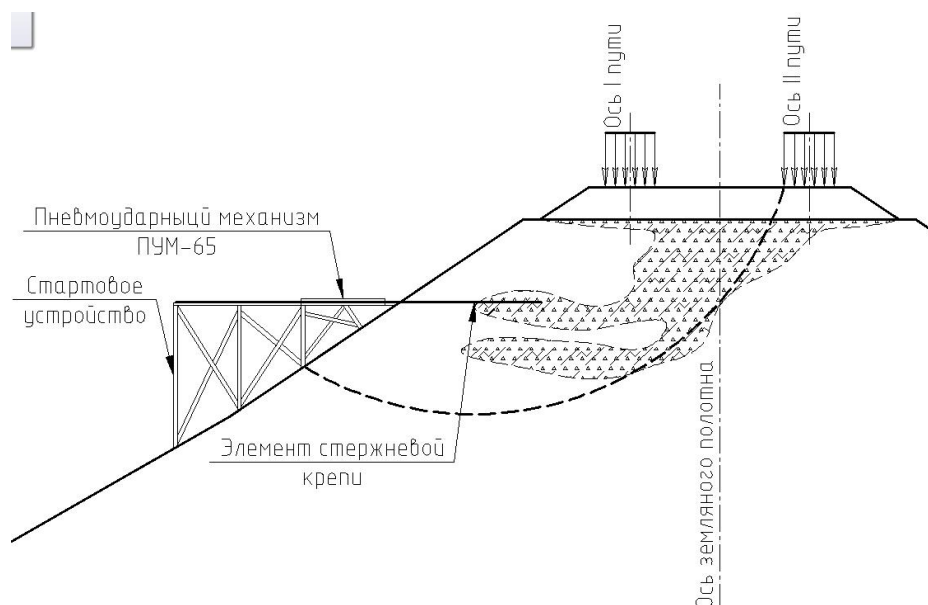


Рисунок 3.5 - Схема забивання стрижнів

Занурення стрижнів виконується до проектної позначки, після чого проводиться обрізка вільного кінця стрижня. Обрізка проводиться з такою умовою, щоб на поверхні залишився випуск стрижня достатньої довжини для кріплення

геоячеек. Укладання геоячеек на поверхню укосу виконується в разі потреби пристрої захисту укосу від вітрової та водної ерозії.

Паралельно із зануренням в тіло земляного полотна стрижневих елементів, в разі необхідності додаткового осушення земляного полотна, влаштовуються трубчасті дренажі. Виконання даної роботи має на увазі пристрій водозбірного колектора в підставі укосу насипу, буріння свердловин з використанням обсадних труб і подальшою установкою дренажних труб. Місця влаштування трубчастих дренажів визначаються на основі аналізу інженерно-геологічної будови тіла земляного полотна. Схема пристрою трубчастого дренажу зображена на рис. 3.6.

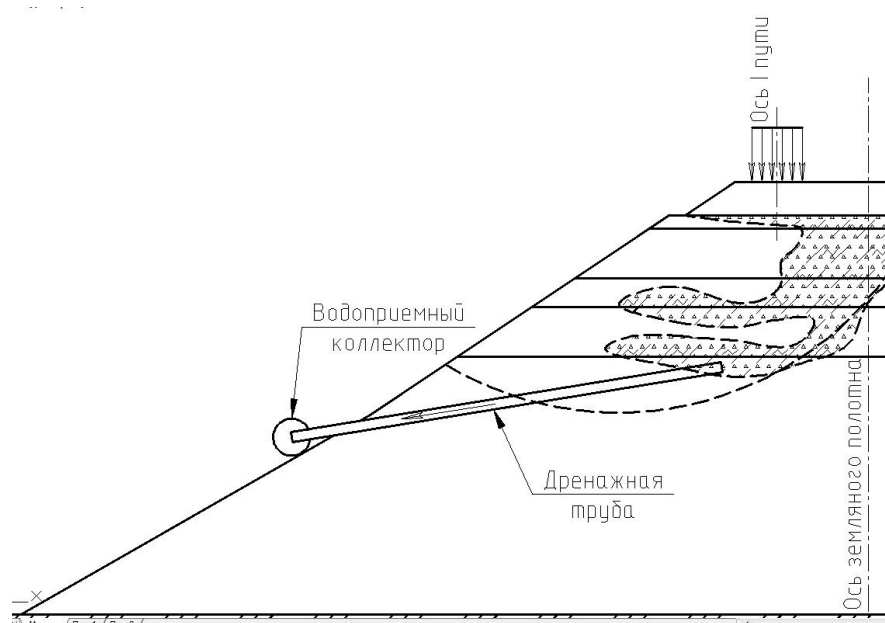


Рисунок 3.6 - Схема пристрою трубчастого дренажу

Нагнітання твердіє розчину слід виконувати після завершення робіт по влаштуванню трубчастого дренажу, в результаті чого, за рахунок виникнення надлишкового тиску, відбувається витіснення води із зони обводнення. Нагнітання розчину здійснюється з основного майданчика і укосів земляного полотна через ін'єктори, для чого використовується розчинонасос високого тиску. Для приготування твердіє розчину застосовується растворосмеситель, забезпечений прийомним бункером і вібросито. Схема нагнітання розчину зображена на рисунку 3.7.

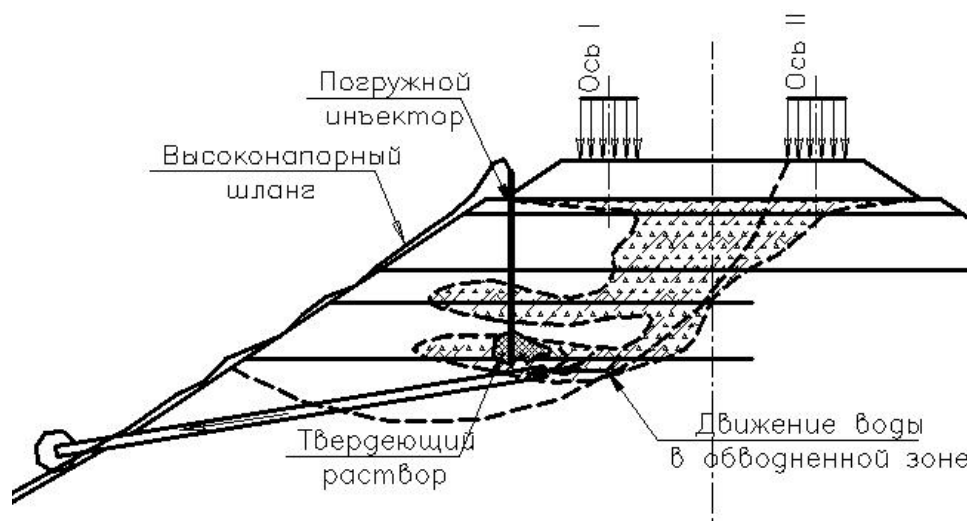


Рисунок 3.7 - Схема нагнітання твердіє розчину

У випадку, коли глибина забивання перевищує 3,0 м, використовується друга методика, коли розчин нагнітається через ін'єкційні стрижні. При цьому використовуються порожнисті стрижні (труби), забезпечені втрачається наконечником.

Методика робіт полягає в забиванні стрижнів до проектного положення з наступним нагнітанням розчину висхідним способом (рисунок 3.8). При використанні такої методики можливо повністю виключити роботи на основній площадці земляного полотна.

Особливості виконання робіт за даною методикою полягають в тому, що в першу чергу виконуються операції по влаштуванню трубчастих дренажів, після чого виробляється забивання порожнистих стрижнів з втрачається наконечником в тіло земляного полотна аналогічно схемі, наведеній вище. При цьому після занурення порожнистих стрижнів стартовий пристрій не демонтується, а використовується в процесі нагнітання розчину в якості підтримуючого пристрою. Нагнітання розчину виконується через порожнистий стрижень, для цього до вільного кінця стержня наварюєш штуцер, що представляє собою ділянку труби з різьбленням того ж діаметру, що і стрижень, до якого кріпиться швидкознімний перехідник. Далі виконується витяг полого стрижня на величину, що відповідає

положенню вузла перетину з іншим стрижнем, і виконується подача твердіє розчину.

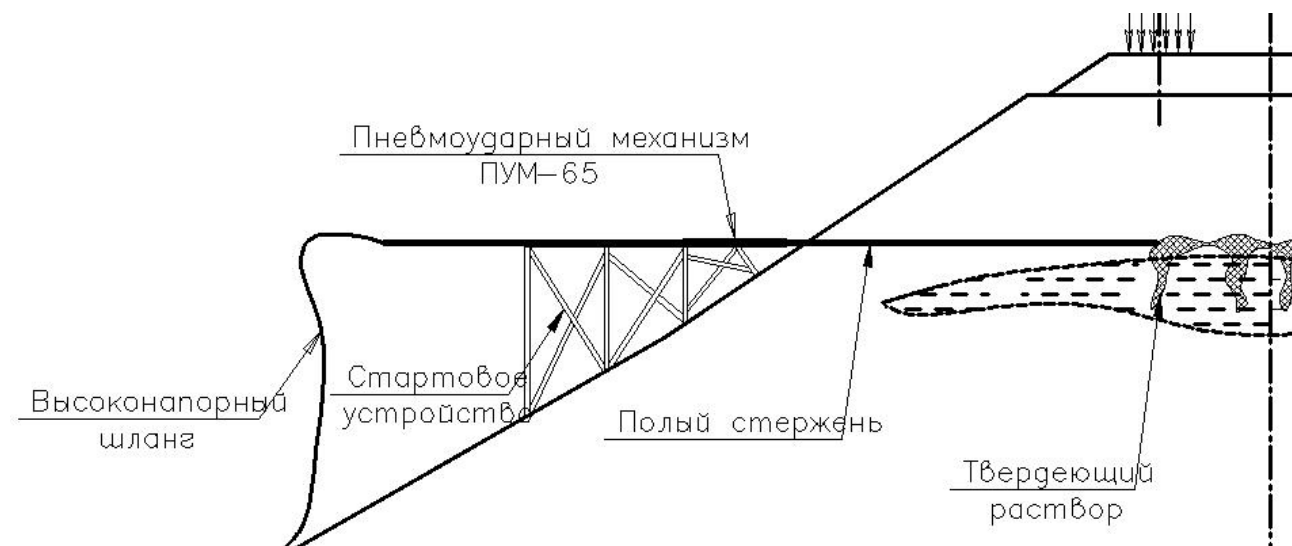


Рисунок 3.8 - Схема нагнітання розчину через порожнисті стрижні

Після закінчення нагнітання розчину в усіх проектних точках порожнисті стрижні домагаються до проектного положення. Вільні кінці стрижнів обрізаються таким чином, щоб залишався запас для закріплення геоячеек.

Проектом зміцнення повинні встановлюватися методи контролю якості робіт, що дозволяють оцінити правильність розташування армуючих елементів.

*Спосіб зміцнення земляного полотна об'ємним багатоелементним армуванням*

На схилі земляного полотна 1 (рисунок 3.9) монтується стартовий пристрій гідропневматичне устаткування (ПУМ) з виставленням проектного кута забивання. Потім проводиться забивання ін'єкційних стрижнів 2 з втрачається наконечником до проектної позначки. Забивання проводиться в декількох ярусах таким чином, щоб стрижні утворювали в одному ярусі грати. З метою звільнення простору для виходу наконечника стрижні висмикуються на 100 мм. Після цього виконуються роботи з підготовки і монтажу дрен 4 і водозбірного колектора 6. Далі готується твердне розчин на основі цементного в'язучого. Нагнітання твердіє розчину 3 проводиться поступово з одночасним отриманням анкерного елемента до поглинання ґрунтом проектного обсягу твердіє розчину 3. При цьому відбувається видалення води 5 з обводненої зони 7 земляного полотна, з одночасною заміною її твердеючим розчином. Після цього стрижні домагаються до проектної позначки. Згодом розчин 3 твердне, об'єднуючи собою всі стрижні 2 в єдиний каркас, що забезпечує додатковий опір ґрунтового масиву стискає і зрушують впливів. Існує також можливість досягнення зазначеного результату шляхом використання ін'єкційних стрижнів з глухим наконечником і перфорованої частиною. В цьому випадку роботи виконуються в наступному порядку.

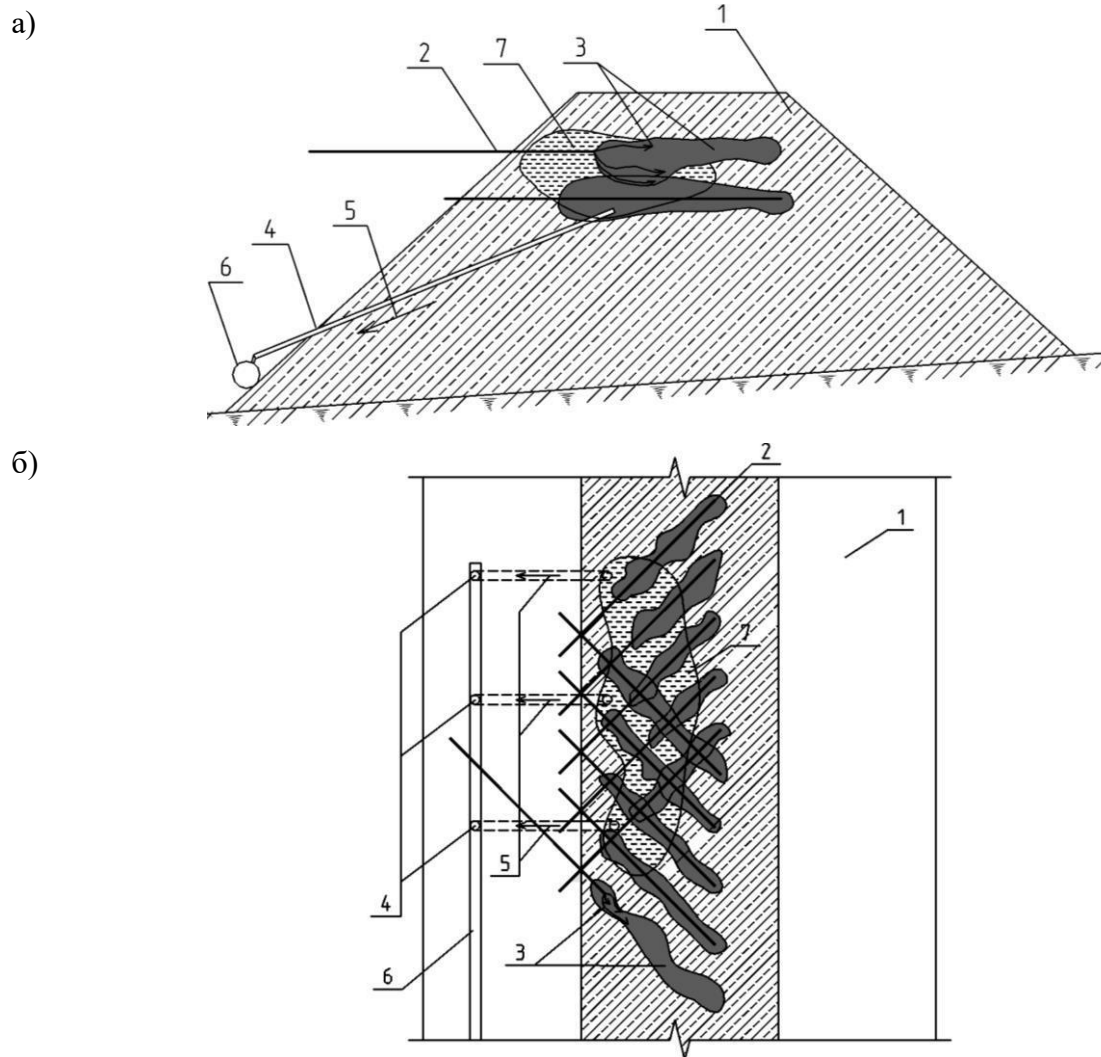


Рисунок 3.9 - Нагнітання розчину через ін'єкційні стрижні: 1 - земляне полотно; 2 - порожнистий стрижень; 3 - твердне розчин; 4 - трубчастий дренаж; 5 - напрямок руху води; 6 - водозбірний колектор; 7 - ослаблена зона

## ВИСНОВОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Визначено найбільш ефективна схема зміцнення земляного полотна, ослабленого баластними заглибленнями. Дана схема передбачає перехресну забивання стрижневих армуючих елементів в декількох горизонтальних площинах і наступне об'єднання їх в єдиний каркас стовпами затверділого розчину. В результаті вдалося досягти збільшення граничного тиску на основному майданчику в 1,5 рази в порівнянні з незміцнене насипом. При цьому навантаження на вісь рухомого складу збільшена до 31 т.

Встановлено межа мінімально допустимих значень механічних характеристик ґрунту, сполученого з ослабленою зоною насипу, при використанні об'ємного багатоелементного армування: модуль деформації  $E$

- не менше 11 МПа, питоме зчеплення ґрунту з - не менше 0,012 МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi$  - не менше  $18^{\circ}$ . У разі, якщо даний ґрунт володіє більш низькими характеристиками, необхідно передбачати додатковий опрацювання його ін'єкція.

Отримано основні залежності зміни механічних характеристик зміцненого шару від параметрів армування, за якими встановлені ефективні параметри армування - глибина закладення елементів армування, крок розстановки точок ін'єкції розчину, крок стрижнів в горизонтальній площині. Також встановлено, що застосування об'ємного багатоелементного армування дозволяє підвищити модуль деформації армованої середовища до 45,1 МПа, граничний тиск на покрівлі армованої середовища - до 0,890 МПа.

Розроблено спосіб зміцнення земляного полотна залізниць для забезпечення стійкості укісних частин об'ємним багатоелементним армуванням, що включає методику його проектування і реалізації.

## БИБЛИОГРАФИЧНИЙ СПИСОК

1. Шахунянц Г.М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. – М.:Трансжелдориздат, 1953.
2. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. – М.: Стройиздат, 1988. – с.
3. Переселенков Г.С., Штейн А.И. О некоторых особенностях методов определения устойчивости откосов грунтовых сооружений // Тр. ЦНИИС – М.: ЦНИИС, 2002. – 214 с.
4. Богомолов А. Н. Оценка напряженно-деформированного состояния, величины коэффициента устойчивости и сил оползневого давления в однородном изотропном откосе с целью управления оползневыми процессами / А. Н. Богомолов [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. – Вып. 10 (29). – С. 74-80.
5. Справочник по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог/ М.В. Аверочкина, С.С. Бабицкая, С.М. Большаков и др.; Под ред. А.Ф. Подпалого, М.А. Чернышева, В.П. Титова. – М.: Транспорт, 1978. – 766 с.
6. Новая технология глубинного направленного уплотнения грунта железнодорожного полотна / М.Я. Крицкий, Х.Б. Ткач, В.М. Сбоев, В.Ф. Скоркин Тр. НГАСУ. – Новосибирск, 2001. – Вып. 2 (13). – С. 112 – 116.
7. Джоунс К.Д. Сооружения из армированного грунта. – М.: Стройиздат, – 1989. – 281 с.
8. Анкерные и армогрунтовые конструкции в транспортном строительстве по материалам зарубежной печати // Транспортное строительство. – 1985. – № 9. – С. 54–56.
9. Армирование грунта и области его применения для повышения устойчивости инженерных сооружений и откосов насыпей (автомобильных и железных дорог). Зарубежный опыт // Путь и стр-во жел. дорог.: Экспресс- информ. – 1971. – № 9. – С. 1–9.

10. Конструкции из армированного грунта в транспортном строительстве Путь и стр-во жел. дорог.: Экспресс-информ. – 1982. – № 23. – С. 10–13.
11. Нетрадиционные армогрунтовые конструкции с применением новых ресурсосберегающих материалов: Сб. науч. тр. / Г.С. Переселенков, А.И. Песов, Ф.И. Целиков и др. – М.: ЦНИИС, 1996. – 64 с.
12. Георгиев А. Новый тип подпорной стенки от армированной насыпи // Строительство. – София, 1978. – № 3. – С. 18-21.
13. Евдокимова И.М., Фоксов Б.Б., Хамадов Б.Х. Плотины из армированного грунта // Натур. и лаб. исслед. гидротехнич. сооружений. – М., 1987. – С. 76-81.
14. Применение геотекстиля в гидротехническом строительстве: Экспресс-информ. – М.: ВПТИтрансстрой, 1987. – 19 с.
15. Львович Ю.М. Геосинтетические и геопластиковые материалы в дорожном строительстве. Автомобильные дороги: Обзорн. информ. – М.: Инфрмавтодор, 2002. – Вып. 7. – 116 с.
16. Ашпиз Е.С. Опыт применения геосинтетических материалов при усилении и реконструкции земляного полотна железных дорог: М-лы второй междунар. науч.-техн. конф. «Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов» / Под ред. А.В. Петряева, Е.С. Свинцова – СПб.: ПГУПС, 2002. – С. 7 – 14.
17. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
18. Гончарова Л.В., Баранова В.И. Комплексная цементация дисперсных грунтов // Инженерная геология сегодня: теория, практика, проблемы / Под ред. Е.М. Сергеева, В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – С. 282 – 292.
19. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.
20. Ланис А.Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей // Путь и путевое хоз-во. – 2009. – №6. – С. 33-35.
21. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий / М.Я. Крицкий, В.И. Пусков, В.Ф. Скоркин, А.Л. Ланис // Тр.

междунар. науч.-практ. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и трансп. стр-ву. – Пермь.: Изд.-во ПГТУ, 2004. – Т. II. – С. 47-53.

21. Колос А.Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки: Дис. ... канд. техн. наук. / ПГУПС. – СПб., 2000. – 163 с.

22. Ланис А.Л. Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог: Дис. ... канд. техн. наук / СГУПС. – Новосибирск, 2009. – 152 с.

23. Шадунц К.Ш., Ещенко О.Ю. Экспериментальные исследования устойчивости наклонно армированных насыпей // Основания и фундаменты в грунтовых условиях Урала : Сб. науч. тр. – Пермь : Пермск. политехн. ин-т, 1989. – С. 156-161.

24 Семендяев Л.И. Методика расчета насыпей, армированных различными материалами. – М., 2001. – 44 с.

25 Кашарина Т. П, Григорьев-Рудаков К. В. Основные расчетные положения при использовании армированного грунта для усиления системы "грунтовое основание – инженерные сооружения" // Изв. вузов. Северо- Кавказский регион. Технические науки. Спец. вып. : Основания, фундаменты и строительные конструкции. – 2008. – С. 106-109.

26. Ланис А.Л., Овчинников С.А. Усиление грунтов земляного полотна армирующими конструкциями // Тр. IX междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М: Изд-во МГУПС, 2012. – С. 111-113.

27. Мельников Б.Н., Мельников Ю.Б. Проблемы методологии исследования геотехногенных структур / УрО РАН, УГТУ. – Екатеринбург, 1998. – 304 с.

*Якуб Б.М.* Теория подобия и теория размерности. – М.: Теплоэнергетика, 1955. – №1. – 52 с.

28. Виноградов В.В. и др. Расчеты и проектирование железнодорожного пути. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с.

29. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, С.И. Клинов и др.; Под ред. Т.Г. Яковлевой. – М.: Транспорт, 1999. – 405 с.