

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**  
**ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту**

«Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

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

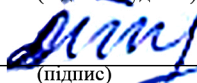
на тему: Статико-динамічний аналіз конструкцій  
пальових фундаментів мостової опори  
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»  
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: MT2326

  
(підпис студента)

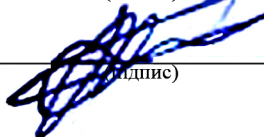
/ Богдан КОЗАК /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

  
(підпис)

/ доц. Ольга ДУБІНЧИК /  
(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  
Dnipro Institute of Infrastructure and Transport**

**Building, architecture and infrastructure**  
(faculty)

---

**Transport infrastructure**  
(department)

---

**Explanatory Note  
to Master's Thesis  
Master  
(higher education degree)**

on the topic: Static and dynamic analysis of structures  
of pile foundations of bridge piers

according to educational curriculum Bridges and vehicular traffic tunnels

in the Specialization: 192 Building and civil engineering  
(Specialization and its code )

---

Done by the student of the group: MT2326 / Bohdan KOZAK /  
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Associate prof. Olha DUBINCHYK /  
(position, name, surname)

Normative controller : / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /  
(position, name, surname)

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**  
**ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту**

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Мости і транспортні тунелі»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата \_\_\_\_\_

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Козаку Богдану Юрійовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Статико-динамічний аналіз конструкцій пальових фундаментів мостової опори»

Керівник роботи: Дубінчик Ольга Іванівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом від «16» лютого 2024 р. № 157ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу вихідних даних про систему «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

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

Вступ. Розділ 1. Дослідження особливостей чисельного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа». Розділ 2. Побудова скінченно-елементних моделей пальових фундаментів мостових опор, що взаємодіють із ґрунтовою основою. Розділ 3. Аналіз результатів статико-динамічного аналізу конструкцій стояна й проміжної опори. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів).

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Розділ 1. Дослідження особливостей чисельного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа».	02.09.2024-29.09.2024	
2	Розділ 2. Побудова скінченно-елементних моделей пальових фундаментів мостових опор, що взаємодіють із ґрунтовою основою.	30.09.2024-03.11.2024	
3	Розділ 3. Аналіз результатів статико-динамічного аналізу конструкцій стояна й проміжної опори. Висновки. Оформлення ВКР.	04.11.2024-05.12.2024	
4	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	09.12.2024-12.01.2025	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2025	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Богдан КОЗАК

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ольга ДУБІНЧИК

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 стор., 34 рис., 2 табл., 14 літературних джерел.

Об'єкт розробки – пальовий фундамент берегової та проміжної мостових опор.

Мета роботи – статико-динамічний аналіз конструкцій пальових фундаментів мостової опори.

Метод дослідження – метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано аналіз особливостей чисельного динамічного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа». Проведений аналіз вихідних даних про систему «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа».

На основі методу скінченних елементів виконана побудова скінченно-елементних моделей пальових фундаментів мостових опор, що взаємодіють із ґрунтовою основою.

Виконаний аналіз результатів статико-динамічного аналізу конструкцій стояна й проміжної опори.

Ключові слова: ПАЛЬОВИЙ ФУНДАМЕНТ, МОСТОВА ОПОРА, СТАТИКО-ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ФОРМИ І ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ПАЛЬОВИЙ ФУНДАМЕНТ МОСТОВОЇ ОПОРИ – ҐРУНТОВА ОСНОВА»..	9
1.1 Чисельний аналіз взаємодії в системі «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» .....	9
1.2 Особливості чисельного динамічного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» .....	11
1.3 Аналіз вихідних даних про систему «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» .....	15
2 ПОБУДОВА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ МОСТОВИХ ОПОР, ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ ІЗ ҐРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ .....	23
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ КОНСТРУКЦІЙ СТОЯНА Й ПРОМІЖНОЇ ОПОРИ .....	35
3.1 Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту стояна і ґрунтової основи .....	35
3.2 Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту проміжної опори шляхопроводу і ґрунтової основи .....	41
3.3 Аналіз форм і частот власних коливань та динамічних напружень фундаменту стояна і ґрунтової основи .....	46
3.4 Аналіз форм і частот власних коливань та динамічних напружень фундаменту проміжної опори і ґрунтової основи .....	51
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	59

## ВСТУП

Поступовий перехід залізниць на швидкісний та високошвидкісний рух підвищує актуальність досліджень напружено-деформованого стану (НДС) елементів мостів (шляхопроводів) при поїзному навантаженні. При цьому комплекс досліджень повинен дещо збільшуватися у випадку аналізу напружень та переміщень фундаментів стоянів і проміжних опор мостових переходів, оскільки динамічний вплив поїзду відрізняється специфічністю умов розповсюдження хвиль коливань в тілі насипу і переході в тіло стояна.

Під час аналізу роботи конструкцій мостових опор та їхніх фундаментів, слід зважати на те, що вони взаємодіють з ґрунтовою основою і саме особливості цієї взаємодії диктують формування НДС. При цьому слід брати до уваги, що в загальному випадку НДС формується під час динамічного впливу, який в спрощеному вигляді можна змоделювати як набір статичних станів, тобто положень поїзду та вагонів. Однак, найширшу інформацію про пальові фундаменти мостових опор можна отримати лише під час вирішення комплексної постановки – вирішення статичної та динамічної задач.

Рішення статичної задачі надає змогу оцінити вірність прийнятого інженерного рішення, тобто проаналізувати напруження та переміщення фундаменту запроектованого стояна та проміжної опори при дії власної ваги та поїздного навантаження, із визначенням несучої здатності як його елементів (палі, ростверк, перехід палі до ростверку), так і конструкцій фундаментів взагалі. Детальність отриманої інформації про НДС фундаментів та оточуючого ґрунту дозволяє зробити висновок про його подальшу експлуатацію.

Вже під час статичної постановки враховується можливість декількох сценаріїв постановки поїзду відносно опори та прогонової будови. Тому отримані значення НДС статичної задачі дозволяють оцінити конструкцію, що досліджується, не в одному стані, а деякому спектрі станів, які достатньо повно описують роботу пального фундаменту мостових опор і надають можливості оцінити їхню міцність.

Постановка динамічної задачі дослідження поїзного впливу є більш складною, ніж статична, оскільки розрахункова область – стоян або проміжна опора, фундамент, навколишній ґрунт та частина залізничного насипу – має значні розміри, а підвищення розмірності задачі унеможливорює її рішення на персональному комп'ютері. Складність також відмічається при виборі комплексу навантажень, оскільки положення поїзного впливу змінюється, і ця зміна впливає на НДС як насипу, так і стояна або проміжної опори.

Однак, навіть під час динамічного аналізу, що проведений не на потужній робочій станції, а на персональному ноутбучі із застосуванням зменшених скінченно-елементних моделей, дані про власні коливання, а також про динамічні переміщення є первинними даними для подальшого аналізу складних конструкцій мостової опори на вимушені дії. Проте, навіть ці дані модального аналізу вже дозволяють оцінити можливість впливу на ґрунтову основу і визначити вірогідність її руйнування.

Таким чином, мета роботи полягає у дослідженні конструкцій пальових фундаментів мостової опори, тобто визначенні характеристик напружено-деформованого стану та форм і частот фундаменту опор шляхопроводу в ході статико-динамічного чисельного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа».

# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ПАЛЬОВИЙ ФУНДАМЕНТ МОСТОВОЇ ОПОРИ – ГРУНТОВА ОСНОВА»

## 1.1 Чисельний аналіз взаємодії в системі «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа»

Однією з найважливіших проблем, що розглядаються дослідниками, є взаємодія частин системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа», а саме, фундаменту споруди і ґрунтової основи. Це питання якнайповніше стало розроблятися із застосуванням моделювання чисельними методами, особливо методом скінченних елементів, оскільки специфічні властивості даного методу приводять до деяких ускладнень в процесі моделювання.

Крім питань, пов'язаних власне з реалізацією методу скінченних елементів – МСЕ (адекватна і коректна побудова моделі, введення граничних умов і т.п.), існує ряд задач, що стосуються відображення дійсних особливостей взаємодії фундаменту і основи. До них відносяться:

1. Обґрунтоване визначення розмірів моделі, а саме, її товщина, з урахуванням концепцій пружного півпростору або пружного шару.
2. Адекватне моделювання контакту фундаменту і основи.
3. Урахування складних взаємодій в системі «фундамент – основа».

Дослідження класичних моделей концепцій пружного півпростору або шару скінченної товщини, а також різних властивостей за допомогою МСЕ зіграло важливу роль в побудові моделей, найбільш адекватно тих, що відповідають дійсності.

В даний час з розвитком МСЕ в дослідженнях взаємодії споруд з ґрунтовими основами широко застосовують модель шару скінченної товщини, що диктується особливостями побудови моделі МСЕ як частини системи. Недостатньо вивченим питанням в цій області залишається наукове обґрунтування товщини скінченного шару, який бере участь в розрахунку МСЕ

і, відповідно, значно впливає на його результати. Застосування різних науково необґрунтованих прийомів при моделюванні ґрунтової основи не може вважатися нормальною практикою в цій області. Причиною недостатньої розробленості даного питання, як втім і інших, вказаних вище, є мале використання вже розроблених положень аналітичної школи [1, 3, 9]. Осмислення вже одержаної інформації із застосуванням чисельних методів є заставою адекватного і коректного використання деяких прийомів моделювання, а також критерієм перевірки вірності рішень, оскільки результати, одержані за допомогою аналітичних методів дослідження, є найбільш науково обґрунтованими.

Також не розроблене питання адекватного моделювання контакту фундаменту і ґрунтової основи МСЕ [2, 12], що недостатньо відображене в роботах дослідників, якими проводилося вивчення фундаментів за допомогою МСЕ [5, 6]. Це питання тісно пов'язане з моделюванням неоднозначних взаємодій фундаментів і частин конструкцій з навколишнім масивом або основою, який також недостатньо вивчений, хоча концепція сукупного аналізу спільної роботи споруди і основи достатньо серйозно розглядалася і обговорювалася, але через складнощі її реалізації не була в достатній мірі використана.

Методи розрахунку основ, що базуються на моделях, які інтерпретують ґрунт відповідно до деяких напрямів механіки ґрунтів або суцільного середовища, показали неспроможність їх застосування через обмеженість інформації, одержуваної на виході, і серйозних математичних труднощів, супутніх процедурі рішення.

Для вирішення задачі в магістерській роботі за допомогою методу скінченних елементів зручно використовувати готові пакети програм призначені для розрахунків подібного характеру – StructureCAD (SCAD) [4, 7, 13], Lira, Ansys, NASTRAN, PLAXIS, Robot.

Кожна з програм призначених для розрахунку напружено-деформованого стану тіла методом скінченних елементів має ряд переваг та недоліків. До них

відносяться зручність – незручність інтерфейсу, максимальна кількість скінченних елементів, які може згенерувати програма, точність розрахунків (можливі помилки), можливість роботи з просторовими елементами. З іншого боку, розмір моделі та кількість часу потрібного для розрахунку залежать від характеристик ЕОМ (потужність процесора, об'єм оперативної пам'яті та жорсткого диску).

Для вирішення обраної задачі був обраний проєктно-обчислювальний комплекс SCAD, як найбільш оптимальний з перерахованих нижче. Цей комплекс запропонований для чисельного дослідження на ЕОМ НДС та стійкості конструкції, а також для автоматизованого виконання ряду процесів конструювання. ПОК SCAD забезпечує дослідження широкого класу конструкцій: просторові стержневі системи, довільні пластинчасті та оболонкові системи, мембрани, масивні тіла, комбіновані системи – рамо-зв'язкові конструкції висотних споруд, плити на ґрунтовій основі, ребристі пластинчасті системи, багатошарові конструкції.

## **1.2 Особливості чисельного динамічного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа»**

Специфічною особливістю роботи транспортних споруд є сприйняття ними динамічних дій від рухомого транспорту. Такі дії в сукупності з різноманітністю місць їх додатку на транспортну споруду істотно ускладнюють розрахунки НДС його основи зважаючи на необхідність обов'язкового урахування не тільки силової, але і інерційної складової. Що при цьому швидко змінюються в часі по величині і напрямку динамічні дії викликають хвильові коливання, як мосту, так і основи, на якому воно встановлене. Найчастіше для даних транспортних споруд у вигляді шляхопроводів різного типу споруда є тією частиною системи, яка сприймає коливання від рухомого джерела, що є у багатьох випадках залізничним складом. Причому його рух може відбуватися з дією на основу як прямо, так і побічно. При непрямій динамічній дії через опору і її фундамент в шляхопроводах мостового типу деформації, що

накопичуються, у вигляді крену фундаменту також ведуть до втрати стійкості споруди і, відповідно, до утрудненої його експлуатації.

Слід зазначити, що складність поведінки споруд і ґрунтових основ при динамічних навантаженнях істотно вище ніж при статичних, причому в розрахунках НДС основ вимагається оцінювати вплив багатьох чинників, які не враховуються в статичних розрахунках. Існуючі аналітичні положення розділяють область динамічних розрахунків на динаміку споруд і динаміку ґрунтів [9-11, 14]. Такий розподіл застосовується і для статичних розрахунків основ, хоча воно і є значним спрощенням реальної роботи системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа». Застосування сумісного підходу дотепер не знайшло широкого розповсюдження унаслідок складності одночасного аналізу обох частин системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа», яка у разі динамічної дії істотно підвищується. Разом з тим, прагнення до досягнення розрахункових показників, більш адекватних реальним параметрам НДС, примушує знаходити деякі способи урахування як статичних, так і динамічних дій на споруду і ґрунтову основу.

Як відомо, динаміка споруд на ґрунтових основах має розроблені методи розрахунків фундаментів різного типу під машини і устаткування з динамічними навантаженнями [9]. Інженерні розрахунки на основі цих положень відповідають тенденції аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа», а не її частин, базуючись на спрощеннях, що полегшують розрахунок. На основі цих спрощень машина з фундаментом розглядається як масивне тіло з єдиним центром мас, а ґрунтова основа розглядається невагомою, але здібним до пружно-в'язкої деформації. Перевагою такого підходу є те, що визначення динамічних характеристик системи проводиться аналітично за допомогою рішення системи диференціальних рівнянь. Недоліками цих спрощень є: 1) не дуже коректна заміна вагомому масиву невагомим, 2) необхідність пошуку пружних і в'язких (демпфуючих) характеристик основи в лабораторних умовах, 3) відсутність інформації про динамічні параметри основи.

Основним недоліком сучасного підходу до дослідження поведінки споруди і основи є обмежена інформація про поведінку ґрунтової основи при її достатньому об'ємі про саму споруду. Особливість цього підходу дає точніші результати у визначенні динамічних характеристик споруди, але недостатнє знання деформованого стану при динамічних діях на транспортні споруди веде до негативних наслідків при їх проектуванні. Крім того, відсутність прогнозу ситуації приводить до проектування нераціональної конструкції. Разом з тим, отримання достатнього об'єму аналітичних даних про динамічну поведінку споруди шляхом визначення його амплітудно-частотних характеристик і форм коливань не завжди супроводжується отриманням достатньої кількості даних про діючі силові чинники в споруді і основі, тобто визначення напружень і деформацій відходить як би на другий план. Така ситуація приводить до одностороннього розуміння поведінки системи «фундамент–основа», що, у свою чергу, супроводжується неповним урахуванням специфічних властивостей основи, невірним проектуванням і ускладненою експлуатацією транспортних споруд.

Рішення задач динаміки споруд і ґрунтів за допомогою МСЕ відкриває нові можливості для аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа». Достатньо теоретично розроблена динамічна задача МСЕ [10-14] дозволяє проводити модальний аналіз (визначення характеристик власних коливань) і аналіз динамічних параметрів при вимушених коливаннях, причому спектр дій може бути достатньо широкий: періодичні навантаження, імпульсні і ударні дії з різним видом імпульсу і часом його дії, сейсмічна дія. Істотною перевагою МСЕ є можливість як аналізу специфічних динамічних параметрів (аналіз частот і форм коливань), так і аналіз НДС досліджуваної споруди при тих же навантаженнях.

Слід зазначити, що, через складність реалізації динамічних параметрів, навіть при моделюванні МСЕ, рішення задачі взаємодії в системі «фундамент–основа» в динамічній постановці не завжди можливе із забезпеченням високої достовірності і адекватності дійсності. В більшості випадків рішення такої

задачі не вимагається, що обґрунтоване невисокими швидкостями проїзду транспортних засобів. У даних випадках статичної постановки дослідження достатньо, але слід провести ґрунтовний аналіз динамічних дій і обґрунтовано довести невисокий ступінь їх впливу. Якщо ж динамічна складова серйозно впливає на загальну картину поведінки мосту, то її урахування обов'язкове.

Отже, інформація про поведінку споруди, одержана за допомогою МСЕ, є найповнішою. Основним недоліком застосування МСЕ при аналізі динамічних характеристик і параметрів НДС системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» є відсутність достатнього теоретичного обґрунтування сумісної поведінки обох її частин під дією динамічного навантаження. Але даний недолік властивий швидше не теоретичним основам МСЕ, а можливостям інтерпретації ґрунтової основи і його поведінки під дією динамічного навантаження. Таким чином, недостатній об'єм досліджень і застарілі моделі основ вимагають знаходження нових шляхів рішення цієї проблеми.

Реалізація динамічних властивостей МСЕ споруди і основи відрізняється деякими специфічними особливостями, які виділяють цілий ряд задач динамічного характеру в окрему область розрахунків. Особливу складність цих задач бачать в аналізі як статичних параметрів – напружень і деформацій, так і динамічних характеристик – амплітуд і частот коливань, властивих різним їх формам [5, 8].

Шляхопроводи мостового типів є спорудами, які взаємодіють з ґрунтовим масивом через фундамент. Динамічною дією є рухоме навантаження від поїзду. Оцінюючи цю дію по критеріях інтенсивності і частотній характеристиці [9], можна віднести їх до слабких, тобто таким, які не сильно змінюють структуру ґрунту. Певну складність при дослідженні дії навантаження поїзду на основу через фундамент складає вибір підходу при моделюванні даного навантаження, а саме розгляд її в динамічному або квазістатичному вигляді. Причому основну складність складає недостатнє знання про динамічну дію навантаження поїзду, при цьому варіанти розрахунків основ під машини спокійної і неспокійної дії

достатньо розроблені.

Важливо також відзначити, що проблема приєднаних мас ґрунту недостатньо вивчена і часто опускається в динамічних розрахунках, причому моделі основи є безінерційними. Але в наданій роботі заплановано виконати модальний аналіз опори шляхопроводу, в якому приєднані маси будуть враховані, що є науково обґрунтованим підходом із розвиненим алгоритмом, який дозволяє аналізувати як динамічні так і статичні характеристики основи і споруди при динамічних навантаженнях. Проте слід зазначити, що складність поведінки споруди і ґрунтових основ при динамічних навантаженнях істотно вище, ніж при статичних, причому в розрахунках НДС основ вимагається оцінювати вплив багатьох чинників, які не враховуються в статичних розрахунках.

### 1.3 Аналіз вихідних даних про систему «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа»

Після буріння свердловин по осі шляхопроводу біли побудовані стратиграфічні колонки, які відповідають інженерно-геологічним умовам залягання пальового фундаменту (рис. 2.1).

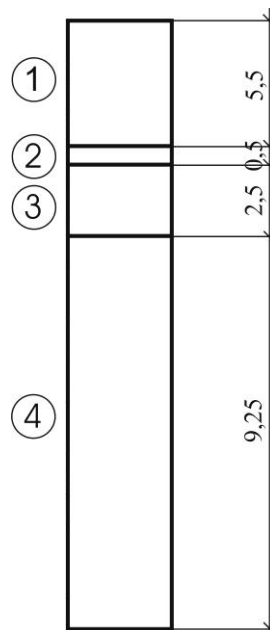


Рисунок 1.1 – Стратиграфічна колонка

(в колах вказані номери інженерно-геологічних елементів – ІГЕ)

Аналіз інженерно-геологічних досліджень ґрунтів свідчить про те, що ґрунти практично однакові за міцністю та деформаційною здатністю. Інженерно-геологічні умови представляють собою ґрунти, які наведені в таблиці 1.1. Залягання ґрунтової води – 6 метрів від денної поверхні. Рівень води – постійний, без коливань. В таблиці 1.2 наведені властивості ґрунтів інженерно-геологічних елементів.

Таблиця 1.1 – Відомість ґрунтів

Номер ІГЕ	Найменування та характеристика ґрунту	Густина $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Товщина шару, м
1	Пісок мілкий, середньої щільності, з вмістом щебеню до 5 %, насипний, малого ступеня водонасичення	1,7	7,5
2	Пісок пухкий, з домішкою органічних речовин, середнього ступеня водонасичення	1,7	0,5
3	Пісок мілкий, з прошарками середньої крупності, середньої щільності, насичений водою	1,8	3,0
4	Пісок середньої крупності, щільний, насичений водою	1,8	13,0

Таблиця 1.2 – Властивості ґрунтів ІГЕ

Номер ІГЕ	Коефіцієнт пористості $e$	Питоме зчеплення $C$ , МПа	Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , град	Модуль пружності $E$ , МПа
1	0,55	0,004	27	50,0
2	0,45	0,004	31	48,0
3	0,55	0,004	27	52,0
4	0,55	0,004	33	75,0

Аналіз інженерно-геологічних досліджень ґрунтів свідчить про те, що ґрунти майже однакові за міцністю (середня) та деформаційною здатністю (незначні деформації). Пісок основи за прогнозом осідань має надати нормальну експлуатацію всієї опори, однак значна водонасиченість ПГЕ 3, 4 та 5 потребує більш детального дослідження взаємодії пальового фундаменту опори із ґрунтовою основою.

При наявності водонасичених ґрунтів в основі можлива ситуація значного динамічного впливу залізничного складу і виникнення ситуації раптового зниження міцності ґрунту внаслідок вібраційного розрідження [10]. Дослідження власних частот опори шляхопроводу, яка не є значно масивною і не може гасити всю енергію коливань, дозволять свідчити про те, яким чином вона передається через ростверк та палі в оточуючий масив.

Основним конструктивним елементом пальового фундаменту являються палі [8]. У даному випадку палий фундамент стояна шляхопроводу споруджується на буронабивних палях (рис. 1.2 та 1.3).

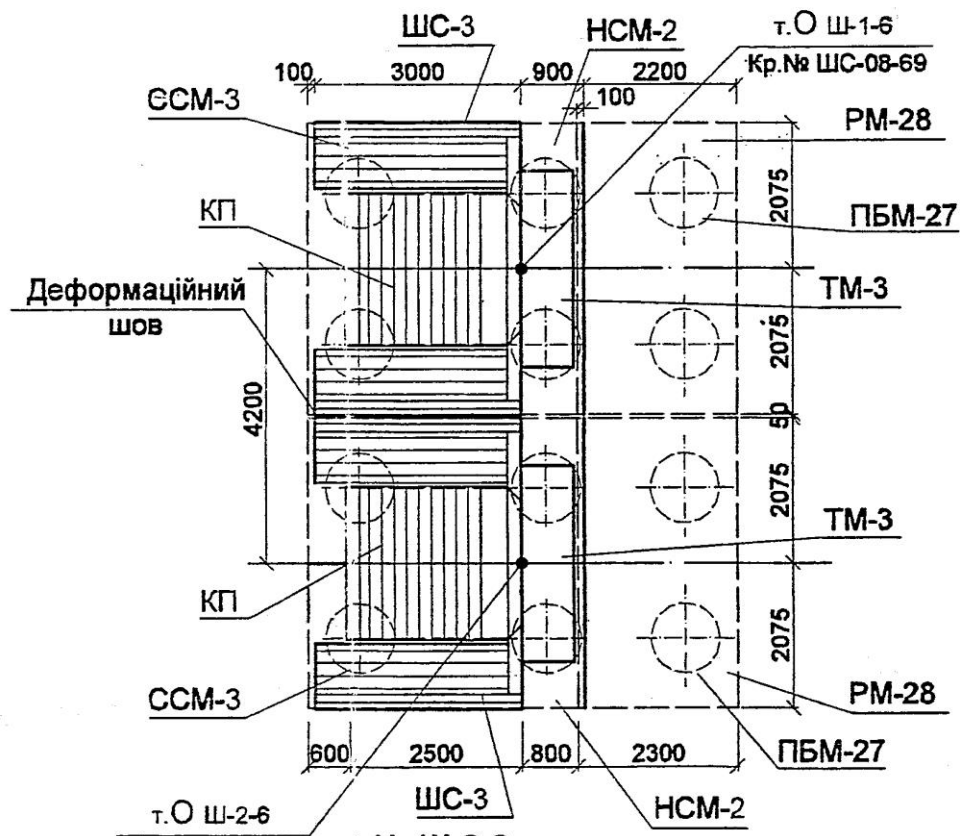


Рисунок 1.2 – Вид стояна зверху

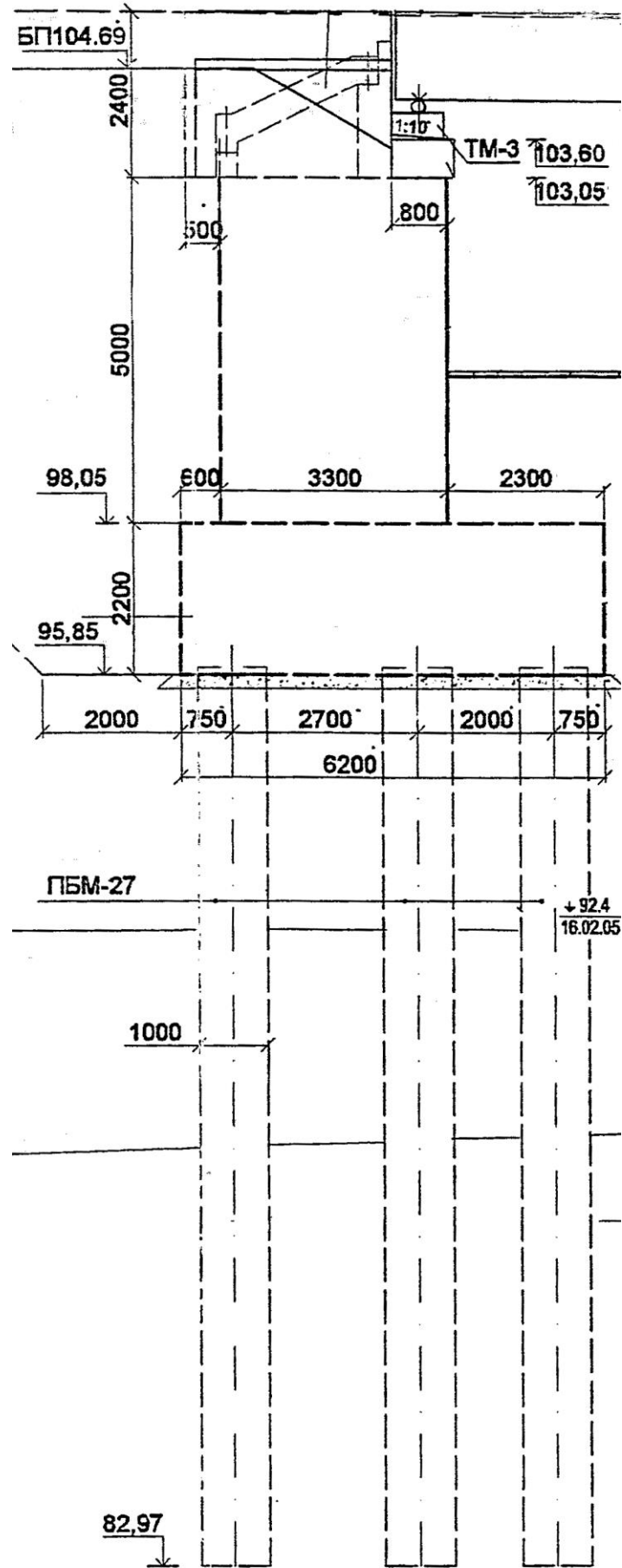


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд стояна

Фундамент споруджується з заглибленим ростверком у пісках. Кількість паль у фундаменті – 12. Армування стояна виконується із декількох окремих арматурних каркасів.

Для бетонування паль використовують бетон класу С25/30. Повна довжина палі стояна, що досліджується – 12,0 м (12,88 м – рівень після зрубування шламу). Відстань між рядами паль 2,2 м. Паля заведена у ростверк на 0,1 м. Для забезпечення закладання паль їх верхні кінці розбиті, арматура оголена та на 1 м заведена у бетон ростверку.

Палі поєднуються ростверком, за допомогою якого забезпечується сумісна робота паль. Розміри ростверку складають – довжина 6,2 м, ширина 8,3 м, висота 2,2 м.

З'єднання ростверку з тілом опори досягається за допомогою арматурних випусків, які розташовані зверху ростверку. Довжина випусків складає 1 м.

Найбільш економічними та розробленими для спорудження для індустріальних методів будівництва є пальові фундаменти. Основним конструктивним елементом пальового фундаменту являються палі. У даному випадку пальовий фундамент проміжної опори шляхопроводу споруджується на буронабивних палях (рис. 1.4).

Фундамент споруджується з заглибленим ростверком. Кількість паль у фундаменті – 4. Пальовий фундамент споруджується переважно у пісках. Для запобігання обвалів цих ґрунтів виконується занурення металевих обсадних труб. Занурення виконується окремими секціями різної довжини, які з'єднуються між собою за допомогою зварювання.

Для з'єднання паль з ростверком установлюють арматурні каркаси, які заводять у тіло паль та ростверку.

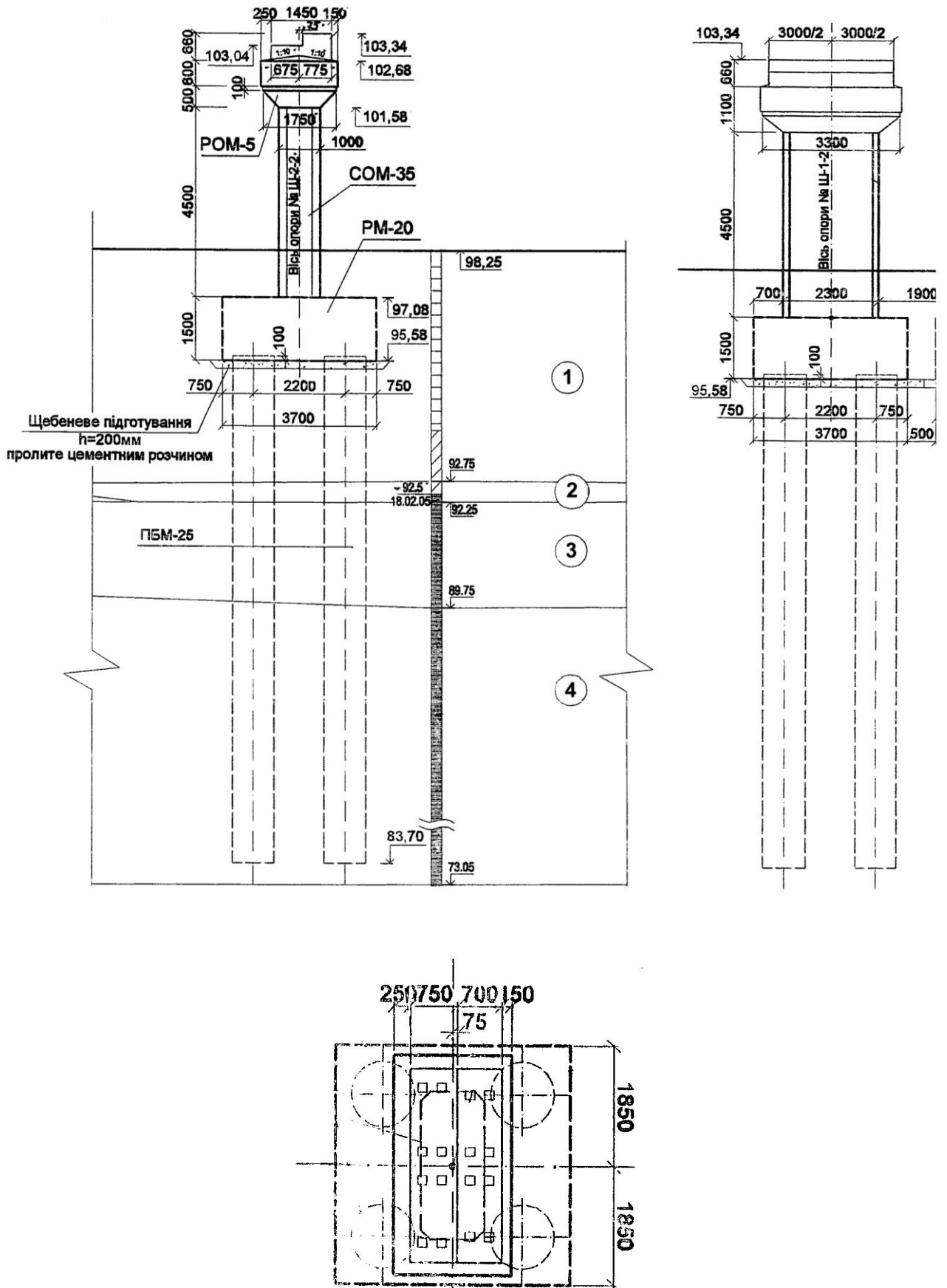


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд проміжної опори



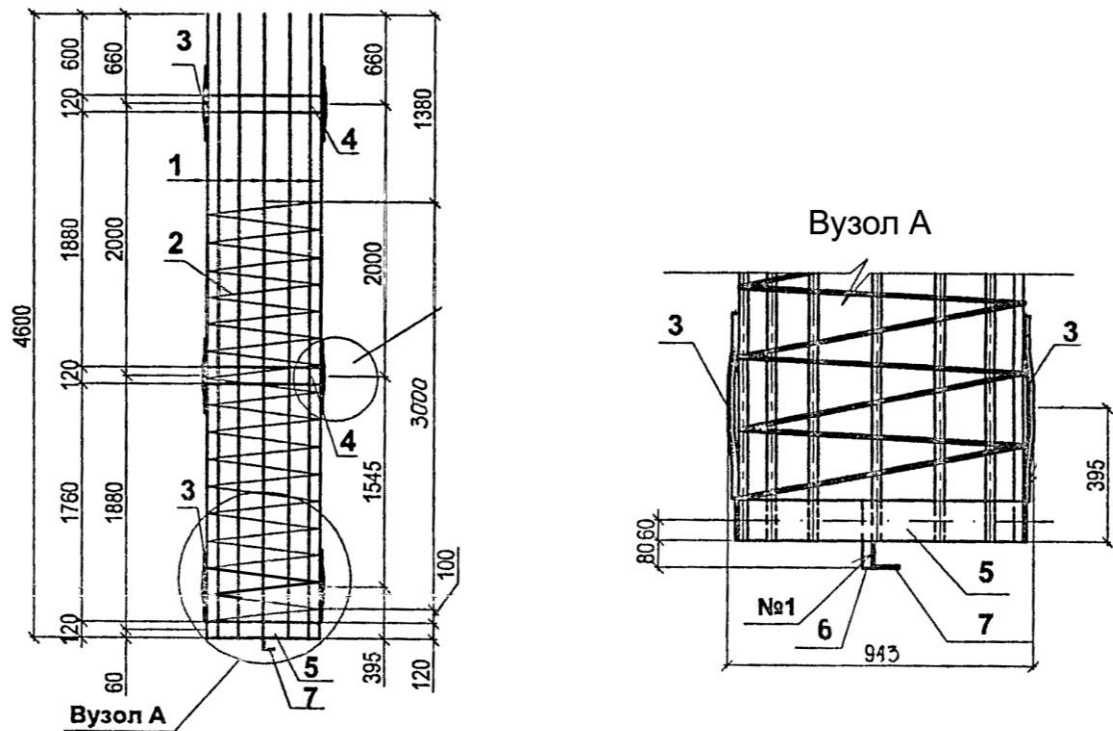


Рисунок 1.6 – Основний вигляд каркасу К-36

Для бетонування палей використовують бетон класу С30/35. Повна довжина палей на опорі, що досліджується – 12,0 м (11,88 м – рівень після зрубівання шламу). Відстань між рядами палей 2,2 м. Палей заведена у ростверк на 0,1 м. Для забезпечення закладання палей їх верхні кінці розбиті, арматура оголена та на 1 м заведена у бетон ростверку.

Палей поєднуються ростверком, за допомогою якого забезпечується сумісна робота палей. Розміри ростверку складають – довжина і ширина 3,7 м, висота 1,5 м. Арматурні сітки виготовляються із повздовжніх та поперечних стержнів А400С Ø 32мм із сталі 35ГС. На верхній площині ростверку (обрізу палевого фундаменту) зводять тіло опори.

З'єднання ростверку з тілом опори досягається за допомогою арматурних випусків, які розташовані зверху ростверку. Довжина випусків складає 1 м. Фіксацію їх положення при бетонуванні забезпечують за допомогою кондукторів.

## 2 ПОБУДОВА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ МОСТОВИХ ОПОР, ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ ІЗ ҐРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ

Для розрахунку пальового фундаменту стояна, який взаємодіє із оточуючим масивом, вирішено застосовувати метод скінченних елементів (МСЕ) на основі Structure CAD for Windows, version 7.31 R.4 (SCAD) [7]. У ПОК SCAD всі етапи вирішення задач за МСЕ є автоматизованими, зокрема і процес генерації сітки скінченних елементів. У ПОК SCAD включена велика кількість типів скінченних елементів. Основними етапами рішення задач за МСЕ є: розчленування досліджуваної системи на скінченні елементи та призначення вузлових точок, в яких визначаються вузлові переміщення; побудова матриць жорсткості формування системи канонічних рівнянь, які відображають умови рівноваги у вузлах розрахункової системи; вирішення системи рівнянь та обчислення значень вузлових переміщень; визначення компонентів НДС досліджуваної системи за знайденими значеннями вузлових переміщень.

На рис. 2.1-2.2 наведені моделі стояна.

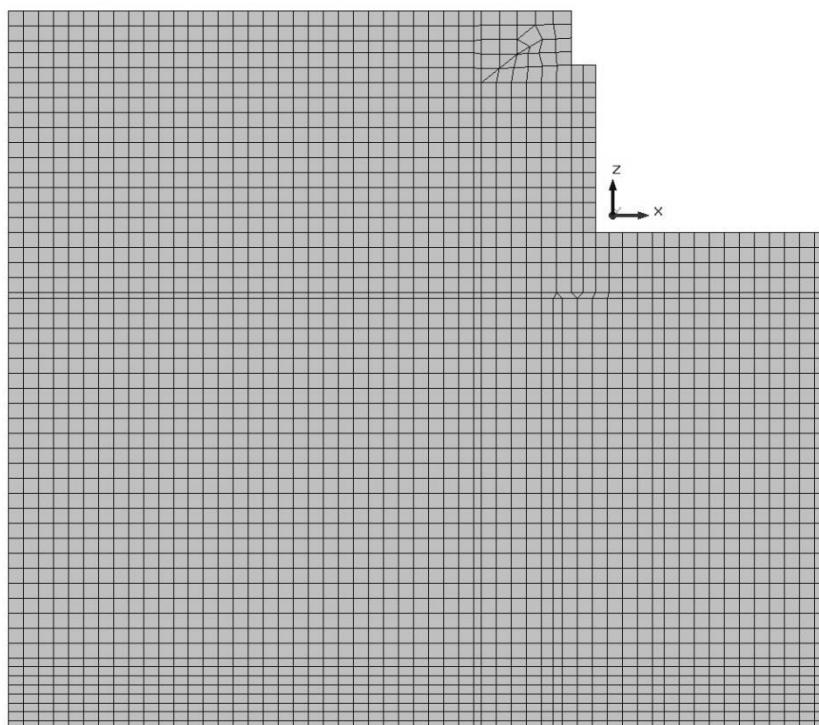


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд моделі

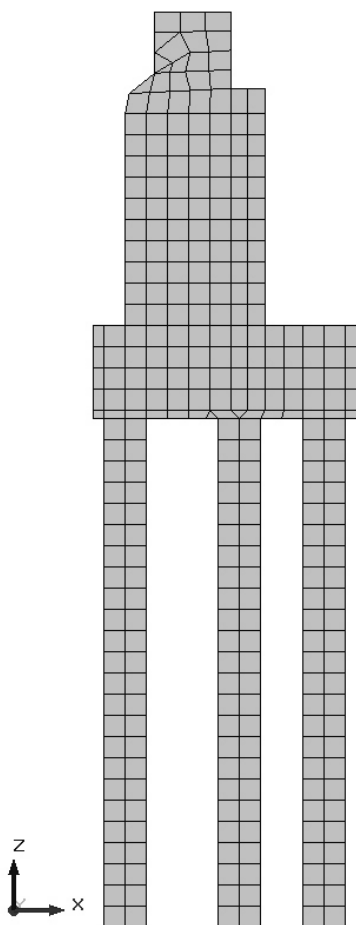


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд моделі (фрагмент – стоян)

Для відтворення особливостей пальового фундаменту стояна в роботі застосовано плоску (квазіпросторову) модель, оскільки створення просторової моделі саме такого типу стояна для SCAD значно утруднене. Це пояснюється складною конфігурацією стояна у вигляді літери «Ш», яка у сукупності із утрудненим процесом моделювання колових обрисів для паль являє надто великі складності. Але рішення МСЕ із застосуванням плоских елементів є точним рішенням теорії пружності, що було викладене у фундаментальних роботах багатьма дослідниками.

Усі розміри ростверку та паль прийняті згідно проектної документації спорудження реального шляхопроводу. SE-модель має деформаційні граничні умови, а саме заборони переміщень по межах моделі: по осям симетрії – заборони переміщення по осі X; по вертикальних межах – заборони переміщень по осям X та Y, по нижній межі – заборони переміщень по осям X, Y та Z.

Постановка граничної умови  $Z$  можлива тому, що під точкою обпирання палі у моделі розміщується шар ґрунту 2,4 м. До верхньої межі моделі граничні умови не прикладаються.

Висота моделі узятя із міркувань сумісної роботи паль та оточуючого масиву, який складений вологими пісками різних фракцій високої стислості. Дані деформаційних характеристик ІГЕ відповідають матеріалам інженерно-геологічних досліджень.

СЕ-моделі надаються деформаційні характеристики – модуль пружності  $E$  та коефіцієнт Пуассону  $\nu$ . На рис. 2.3 надані розміри та карта жорсткостей СЕ-моделі із вказаними номерами жорсткості.

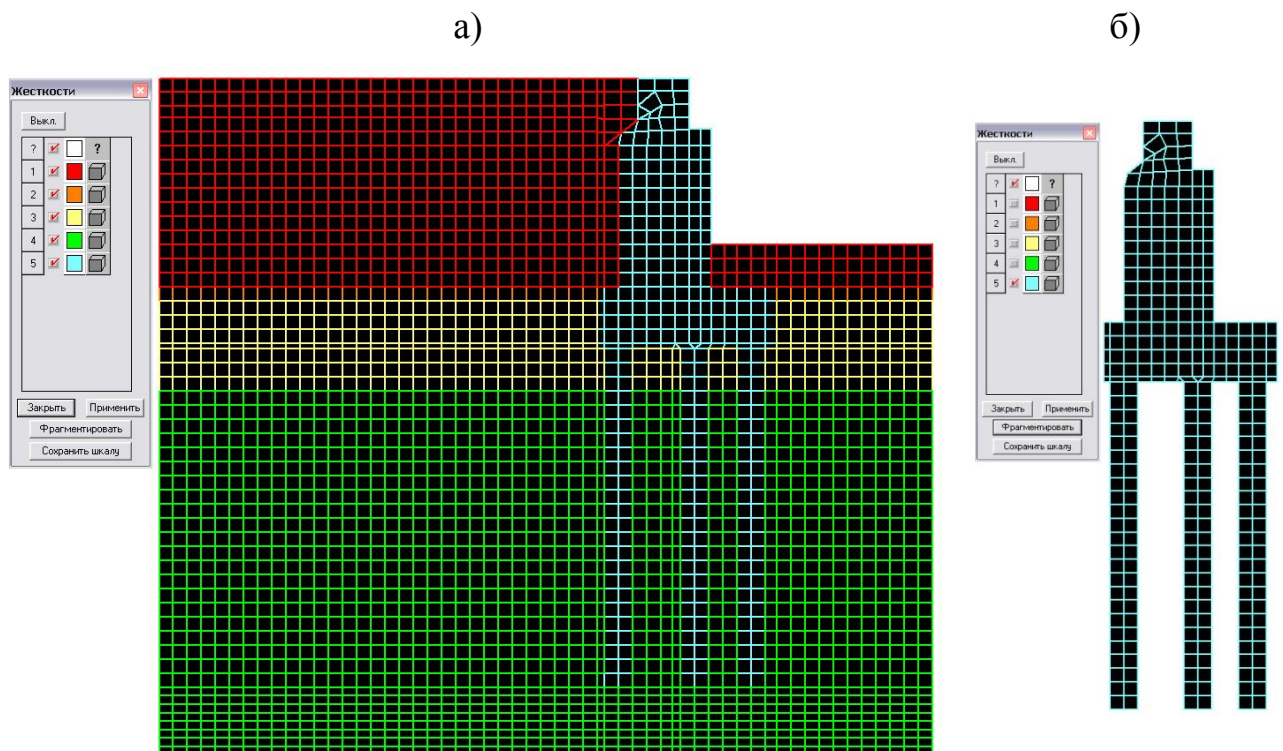


Рисунок 2.3 – Карта жорсткостей пальового фундаменту:

а) фрагмент моделі – тільки залізобетонні елементи;

б) фрагмент моделі – ґрунтовий масив

Жорсткості моделі пальового фундаменту з оточуючим масивом обрано таким чином (рис. 2.3):

Жорсткість 1 (ґрунт основи – пісок ІГЕ 1, товщина шару – 7,5 м): модуль пружності –  $E=50$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 2 (грунт основи – пісок ІГЕ 2, товщина шару – 0,5 м): модуль пружності –  $E=48$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 3 (грунт основи – пісок ІГЕ 3, товщина шару – 3,0 м): модуль пружності –  $E=52$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 4 (грунт основи – пісок ІГЕ 4, товщина шару – 13,0 м): модуль пружності –  $E=75$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 5 (залізобетонні елементи): залізобетон на основі бетону класу С25/30 та арматури класу А400С з процентом армування 5...7 %, модуль пружності –  $E=38\ 000$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,02$ , густина  $\rho=2,5$  т/м<sup>3</sup>.

Значення навантажень у сполученнях, на які перевіряється стоян та його пальовий фундамент:

1 сполучення – власна вага СЕ-моделі із масою однієї прогонової будови, яка спирається на стоян (маса однієї прогонової споруди довжиною 11,5 м складає 22,2 тони, на стоян прикладається половина маси і, таким чином вертикальна складова дорівнює 108,8 кН);

2 сполучення – перше сполучення, з додатком маси поїзду (рис. 2.4), який ще не в'їхав на стоян однією віссю на відстані 0,5 м;

3 сполучення – перше сполучення, з додатком маси поїзду, який вже в'їхав на стоян однією віссю;

4 сполучення – перше сполучення, з додатком маси поїзду, який вже в'їхав на стоян двома осями.

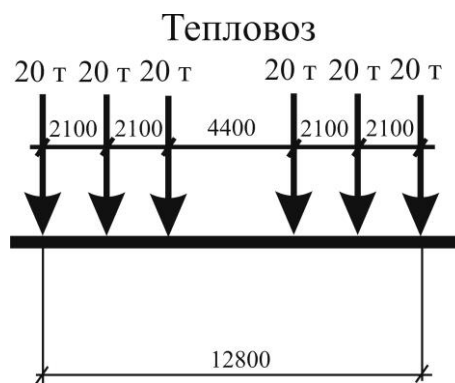


Рисунок 2.4 – Схема поїздного навантаження

Надані навантаження прикладаються наступним чином (рис. 2.5).

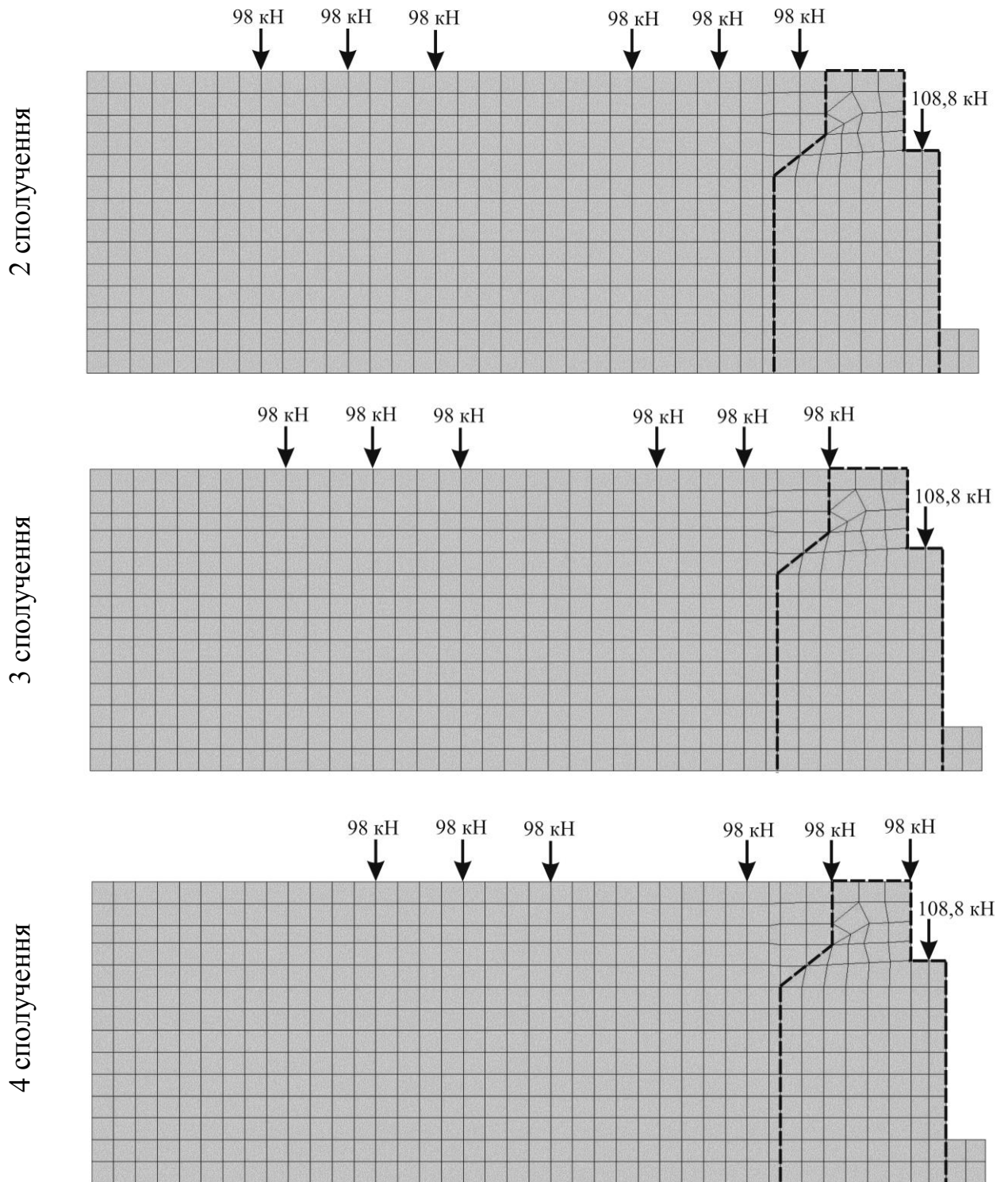


Рисунок 2.5 – Схема прикладення навантажень  
від прогонових будов та тепловозу

Кількість скінченних елементів – 5 430, вузлів – 8 457 (кількість ступенів свободи – близька 25 000, з урахуванням закріплень). Задача вважається задачею середньої розмірності. Після вищенаведених даних проведені

розрахунки пальового фундаменту на 4 сполучення навантажень.

Для відтворення особливостей пальового фундаменту проміжної опори, як і у випадку стояна, застосовано просторову модель, яка найбільш точно відображає його взаємодію із оточуючим масивом. Просторова скінченно-елементна модель (СЕ-модель) відтворюється на основі об'ємних елементів. Для точного моделювання палі та оточуючого палю масиву застосовано ізопараметричний СЕ із сумісними вузлами (типи 34 та 36 у комплексі SCAD). Рішення МСЕ із застосуванням цього елемента є точним рішенням теорії пружності, що було викладене у фундаментальних роботах багатьма дослідниками.

Після створення плоского прототипу, на його основі шляхом екструзії (вичавлювання прототипу за вертикальною віссю) була підготовлена об'ємна заготовка (рис. 2.6), з якої шляхом видалення зайвих об'ємних елементів була створена завершена модель.

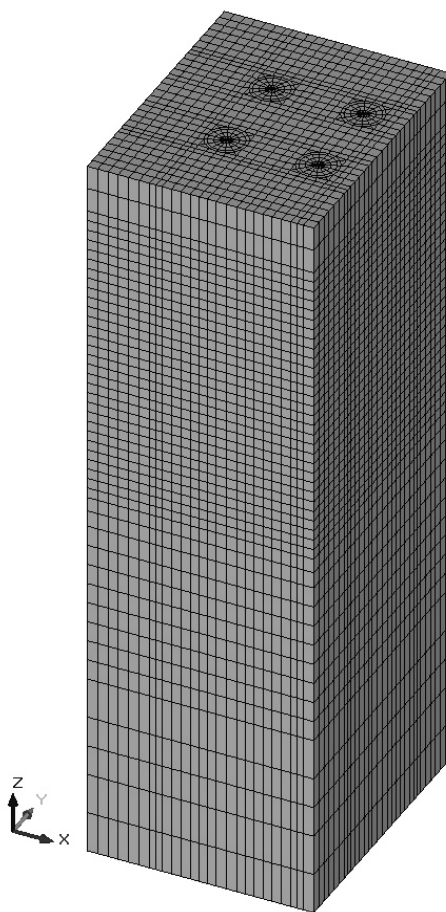


Рисунок 2.6 – Об'ємна заготовка

На рис. 2.7. показана завершена СЕ-модель пальового фундаменту із оточуючим ґрунтом, а на рис. 2.8 – частини системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» в розрізі.

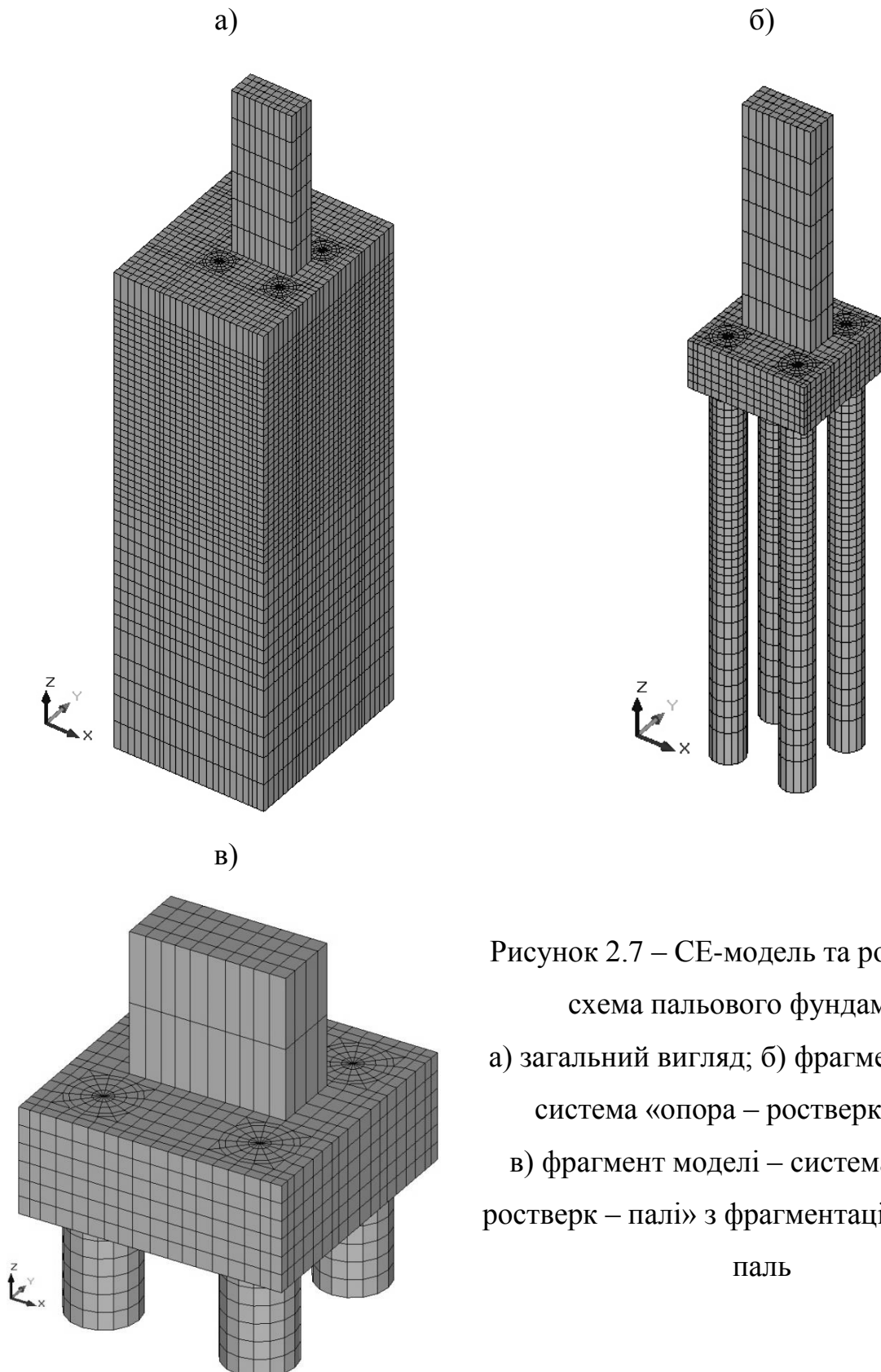


Рисунок 2.7 – СЕ-модель та розрахункова схема пальового фундаменту:

- а) загальний вигляд; б) фрагмент моделі – система «опора – ростверк – палі»;  
 в) фрагмент моделі – система «опора – ростверк – палі» з фрагментацією опори та палі

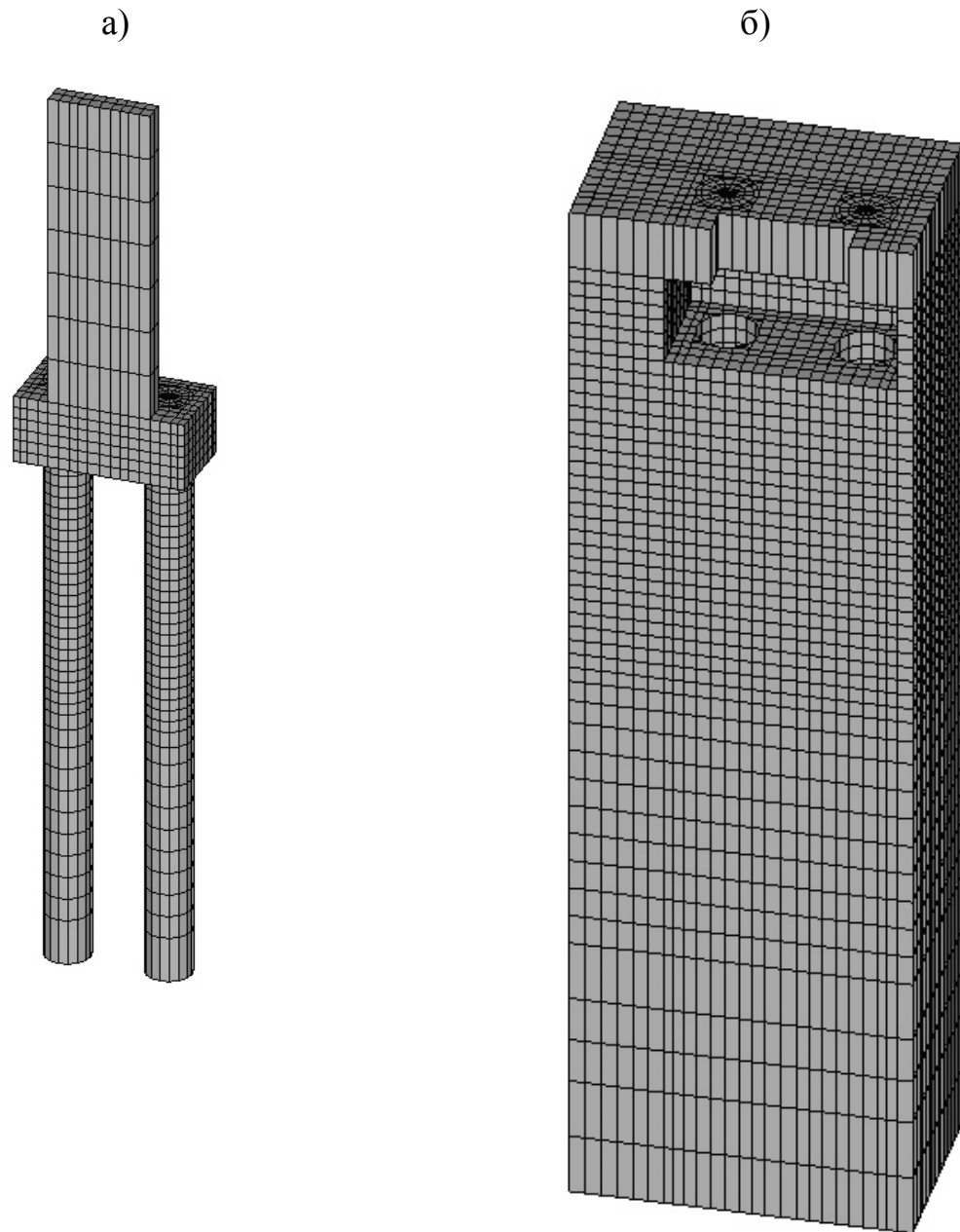


Рисунок 2.8 – Схема двох частин системи в розрізі:

а) залізобетонні елементи; б) ґрунтовий масив

СЕ-модель має деформаційні граничні умови, а саме заборони переміщень по межах моделі: по осям симетрії – заборони переміщення по осі  $X$ ; по вертикальних межах – заборони переміщень по осям  $X$  та  $Y$ , по нижній межі – заборони переміщень по осям  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ . Постановка граничної умови  $Z$  можлива тому, що під точкою обпирання палі у моделі розміщується шар ґрунту 3,5 м. До верхньої межі моделі граничні умови не прикладаються (рис. 2.9).

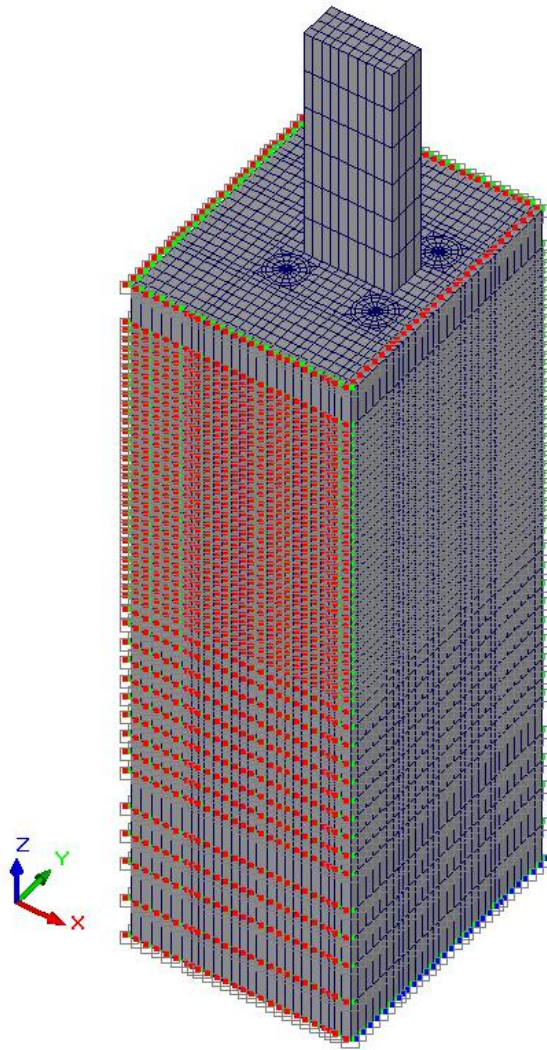


Рисунок 2.9 – Схема граничних умов моделі

Висота моделі узята із міркувань сумісної роботи паль та оточуючого масиву, який складений вологими пісками різних фракцій високої стислості. Дані деформаційних характеристик ІГЕ відповідають матеріалам інженерно-геологічних досліджень. Оточуючий масив навколо фундаменту модельовано SE типу паралелепіпеду із сумісними вузлами (елемент 34 типу SCAD).

Для розрахунку пального фундаменту проміжної опори застосована пружна постановка задачі, оскільки пластичне деформування водонасичених пісків не відбувається [2], тому пружна постановка задачі є обґрунтованою [6]. SE-моделі надаються деформативні характеристики – модуль пружності  $E$  та коефіцієнт Пуассону  $\nu$ . На рис. 2.10 надані розміри та карта жорсткостей SE-моделі із вказаними номерами жорсткості.

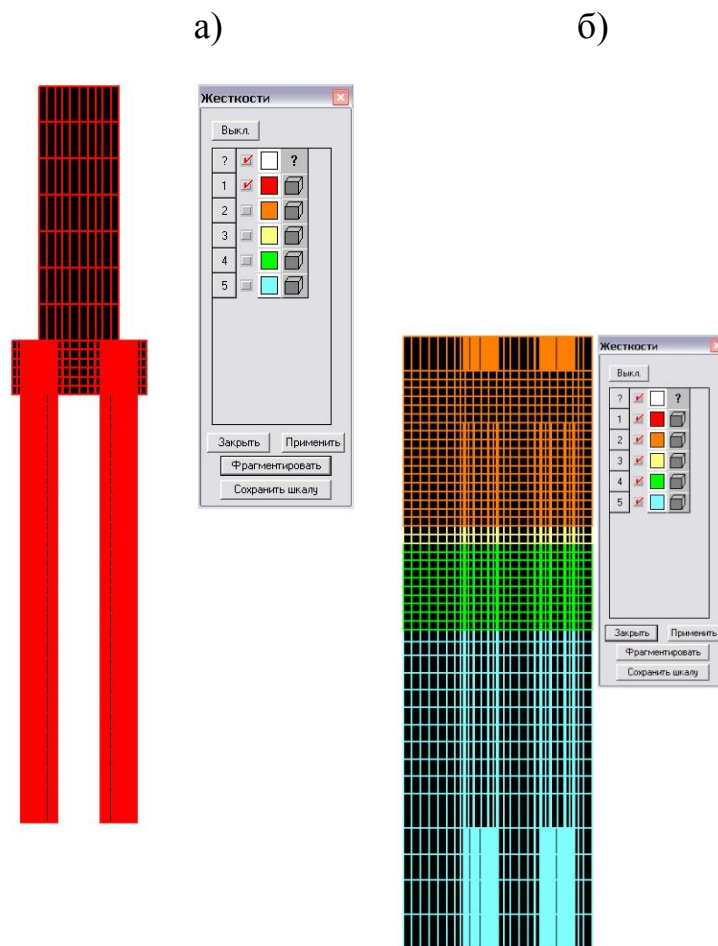


Рисунок 2.10 – Карта жорсткостей пальового фундаменту:  
 а) фрагмент моделі – тільки залізобетонні елементи;  
 б) фрагмент моделі – ґрунтовий масив

Жорсткості моделі пальового фундаменту з оточуючим масивом обрано таким чином (рис. 2.10):

Жорсткість 1 (залізобетонні елементи): залізобетон на основі бетону класу С25/30 та арматури класу А400С з процентом армування 5...7 %, модуль пружності –  $E=38\,000$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,02$ , густина  $\rho=2,5$  т/м<sup>3</sup>.

Жорсткість 2 (ґрунт основи – пісок ІГЕ 1, товщина шару – 5,5 м): модуль пружності –  $E=50$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 3 (ґрунт основи – пісок ІГЕ 2, товщина шару – 0,5 м): модуль пружності –  $E=48$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 4 (ґрунт основи – пісок ІГЕ 3, товщина шару – 2,5 м): модуль пружності –  $E=52$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup>;



Таким чином, сполучення 2 і 3 є несиметричним, оскільки в другому сполученні друга прогонова споруда не завантажена поїзним навантаженням, а в третьому – на різні прогонові будови діє різне поїзне навантаження.

Надані навантаження прикладаються до вузлів верхнього обрізу тіла опори (кількість – 11 штук):

1 сполучення – на одне ребро опори –  $312,9/2=156,5$  кН (на вузол –  $156,5/11=14,2$  кН); на друге ребро опори –  $312,9/2=156,5$  кН (на вузол –  $156,5/11=14,2$  кН);

2 сполучення: на одне ребро опори –  $312,9/2=156,5$  кН (на вузол –  $156,5/11=14,2$  кН); на друге ребро опори –  $156,5+735,8=892,3$  кН (на вузол –  $892,3/11=81,1$  кН);

3 сполучення: на одне ребро опори –  $156,5+294,3=450,8$  кН (на вузол –  $450,8/11=41,0$  кН); на друге ребро опори –  $156,5+735,8=892,3$  кН (на вузол –  $892,3/11=81,1$  кН).

Кількість скінченних елементів – 45 044, вузлів – 46 484 (кількість ступенів свободи – 139 452). Задача вважається задачею середньої розмірності, але об'єктивна заборона комплексу SCAD в 50 000 вузлів свідчить про те, що його властивості майже вичерпано, принаймні SE-модель виконано з максимальним ступенем оптимальності, який полягає у застосуванні оптимальних для даної розрахункової області розмірів скінченних елементів. Більш адекватним було б створення моделі двох опор шляхопроводів, як воно і є насправді, але вирішення такої задачі за допомогою комплексу SCAD цієї версії неможливе. Окрім того, що розрахунок на статичні навантаження проводився більше двох годин, то слід відмітити, що модальний аналіз із першої спроби не був виконаний (розрахунок зупинився на четвертому часі на зміні алгоритму) і слід було провести його спрощення шляхом зменшення частот, які було слід відшукати. Після вищенаведених даних проведені розрахунки пальового фундаменту на 3 сполучення навантажень.

### 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ КОНСТРУКЦІЙ СТОЯНА Й ПРОМІЖНОЇ ОПОРИ

#### 3.1 Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту стояна і ґрунтової основи

Після виконаних розрахунків проведено аналіз переміщень та напружень фундаменту стояна і проміжної опори (рис. 3.1-3.5).

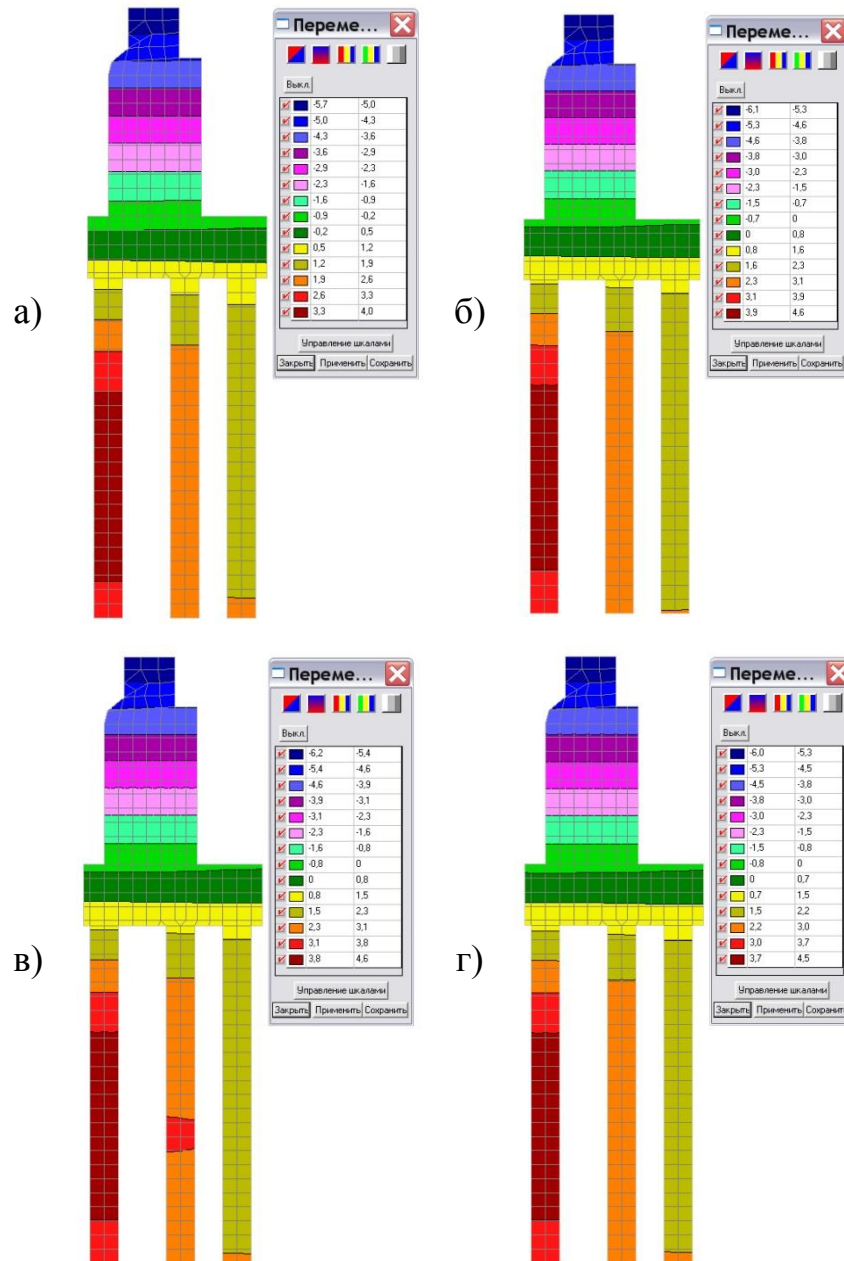


Рисунок 3.1 – Ізолінії та ізополя горизонтальних переміщень в фрагменті моделі стояна: а) 1 сполучення; б) 2 сполучення; в) 3 сполучення; г) 4 сполучення

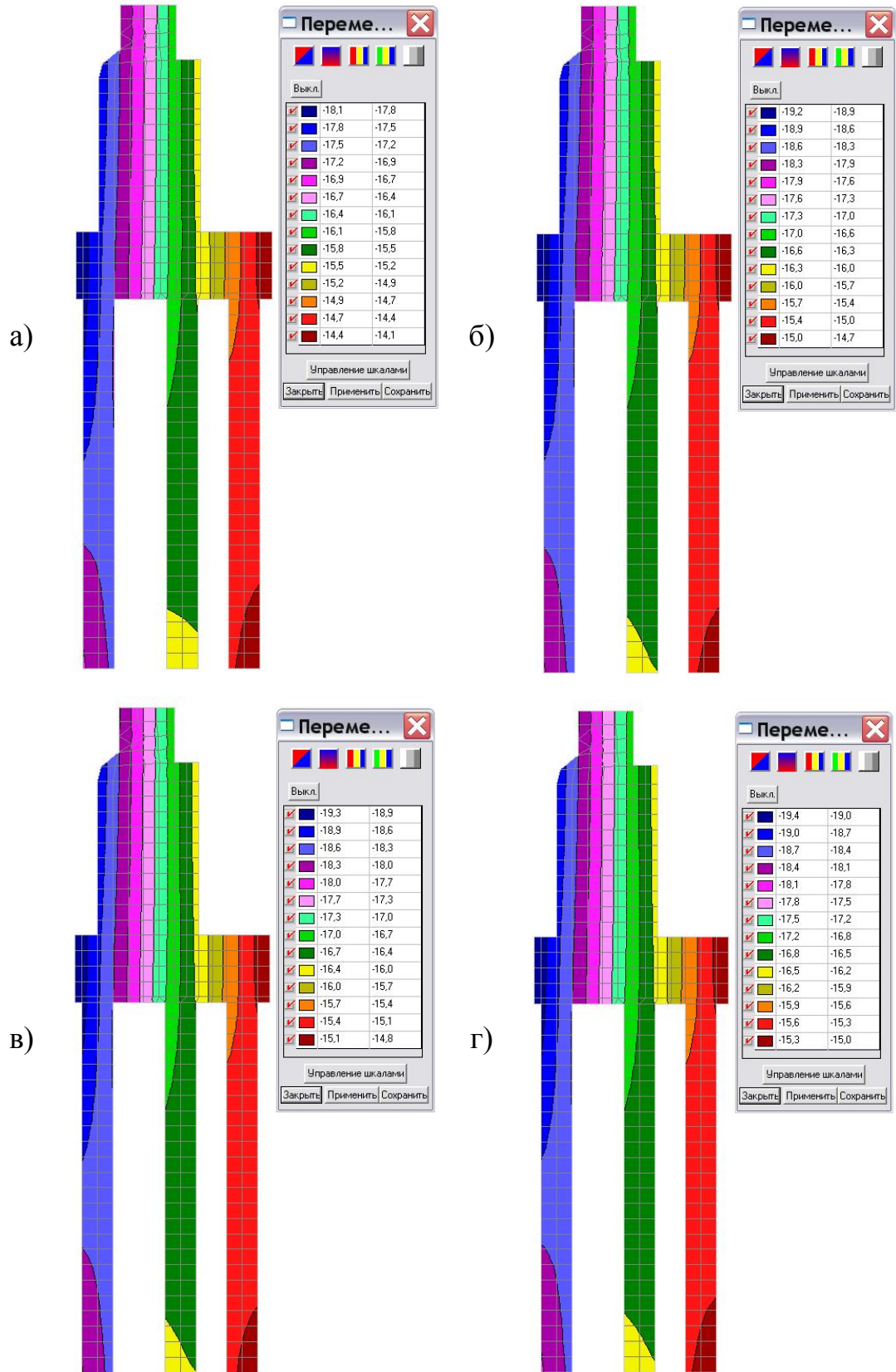


Рисунок 3.2 – Ізолінії та ізополія вертикальних переміщень в фрагменті моделі стояна: а) 1 сполучення; б) 2 сполучення; в) 3 сполучення; г) 4 сполучення

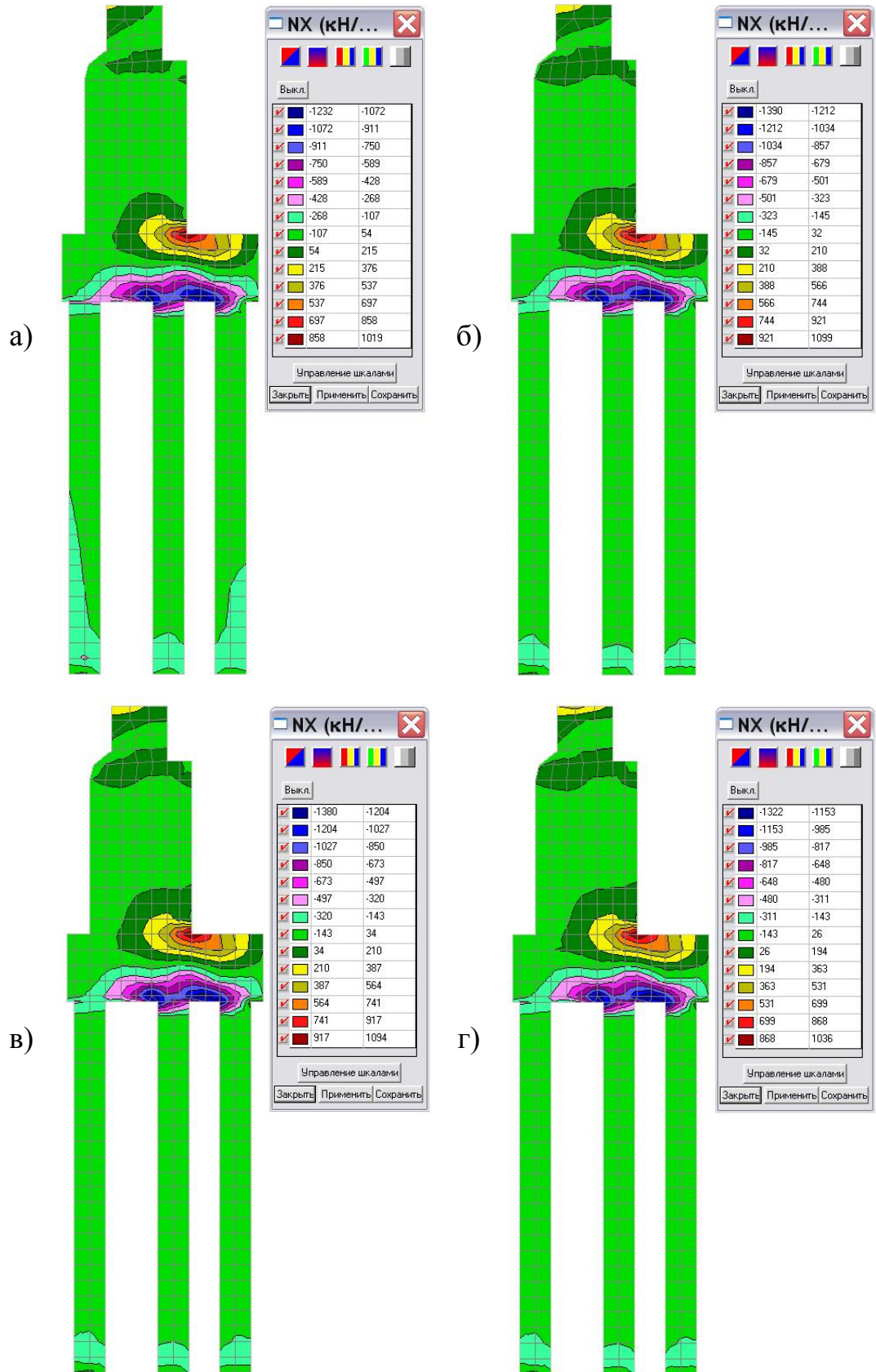


Рисунок 3.3 – Ізолінії та ізополя горизонтальних напружень в фрагменті моделі стояна: а) 1 сполучення; б) 2 сполучення; в) 3 сполучення; г) 4 сполучення

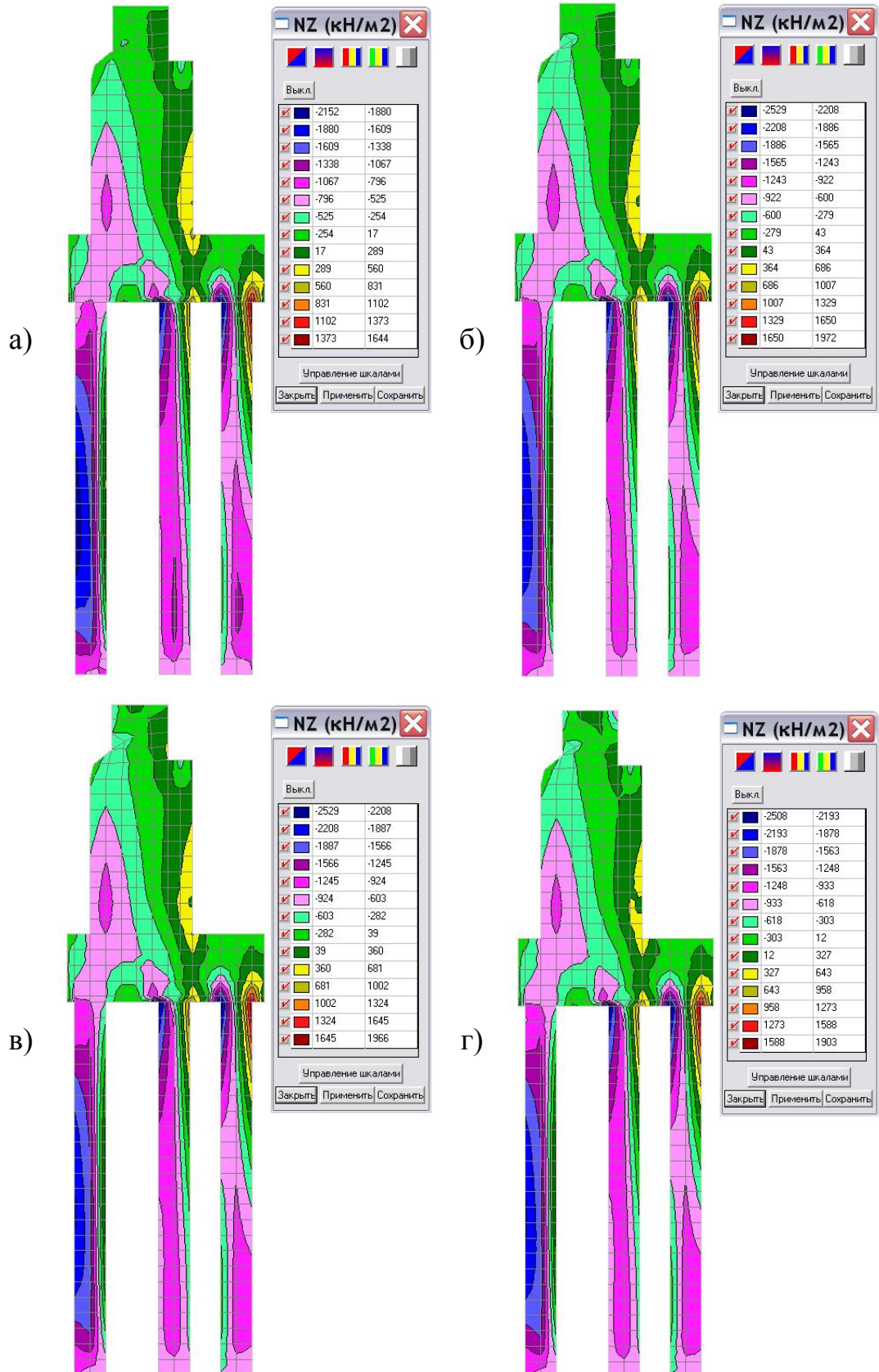


Рисунок 3.4 – Ізолінії та ізополя вертикальних напружень в фрагменті моделі стояна: а) 1 сполучення; б) 2 сполучення; в) 3 сполучення; г) 4 сполучення

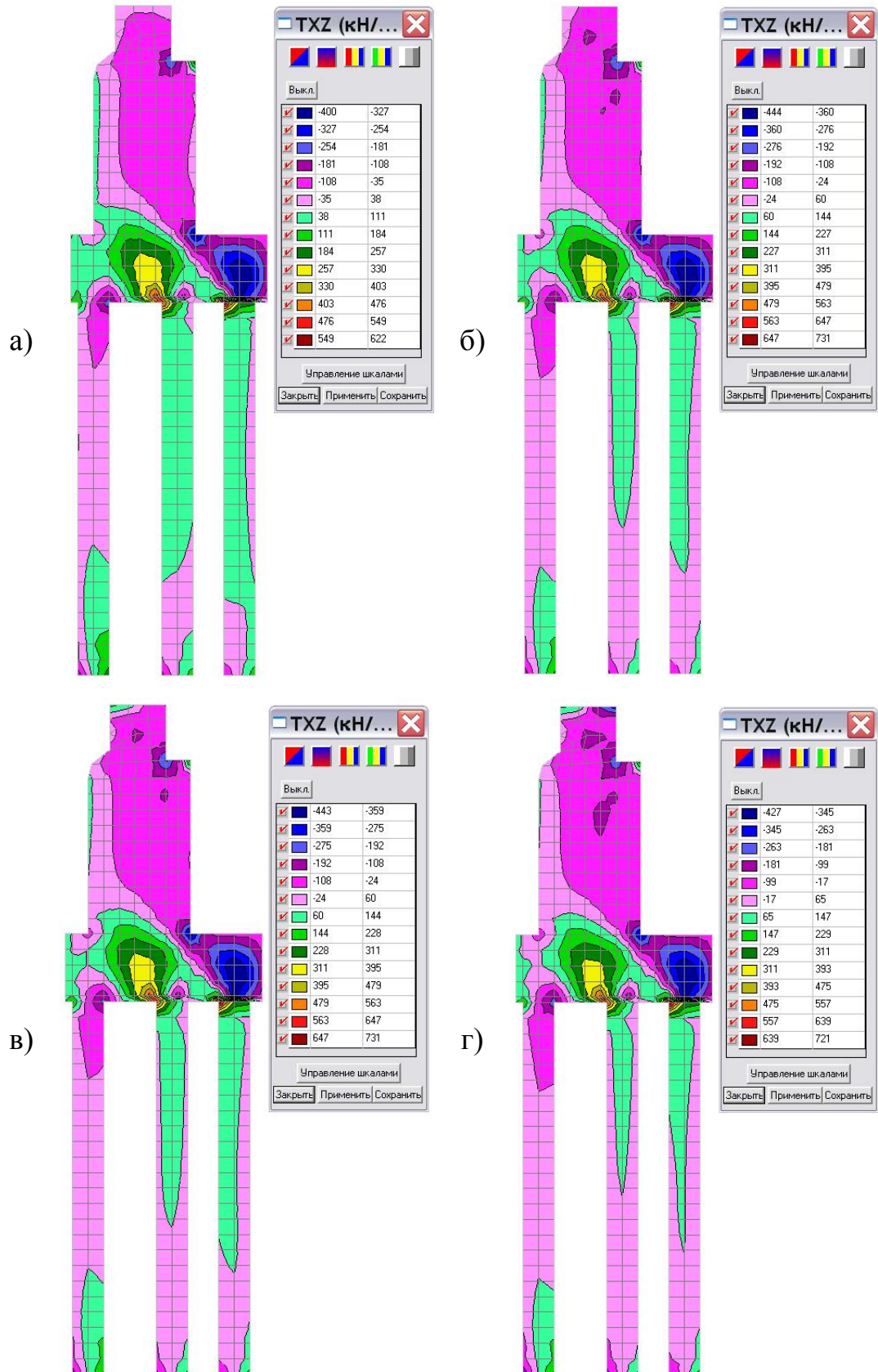


Рисунок 3.5 – Ізолінії та ізополя дотичних напружень в фрагменті моделі стояна: а) 1 сполучення; б) 2 сполучення; в) 3 сполучення; г) 4 сполучення

На рис. 3.1-3.5 наведені основні параметри напружено-деформованого стану фундаменту опори шляхопроводу при дії власної ваги (для порівняння) та по сполученнях.

Аналізуючи переміщення стояна від сполучень, слід відмітити, що їх значення невеликі (горизонтальні переміщення – 5,7...6,0 мм, вертикальні переміщення – 18,1...19,4 мм), причому додавання поїзної ваги більш всього відображається на вертикальних переміщеннях, значення яких зростають до 1 мм.

Найбільш напруженими елементами пальового фундаменту є ростверк (горизонтальні напруження, рис. 3.3) та палі (вертикальні напруження, рис. 3.4 та 3.5), причому концентрація нормальних вертикальних напружень закономірно відбувається в нижній частині палі. Проаналізувавши значення всіх наведених компонент, слід відмітити, що достатньо компонентного аналізу без застосування еквівалентних напружень, оскільки максимальні напруження (вертикальні) складають 1,39...2,53 МПа, що у порівнянні із розрахунковим опором стиску  $R_b$  ( $R_b = [\sigma] = 21$  МПа для палі бетону класу С30/35), надає змогу свідчити про запас міцності у 8 разів.

Напружений стан по трьом сполученням змінюється незначно: для 1 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,6...2,1 МПа (запас міцності – 10 разів); для 2 та 3 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,9...2,53 МПа (запас міцності – 8 разів); для 4 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,9...2,50 МПа (запас міцності – 8 разів). Таким чином, матеріал палі бетон класу С30/35 повністю витримує усі види навантажень, представлених сполученнями. Напружений стан в ростверку подібний напруженому стану палі – значення напружень в концентраторах співпадають.

Висновок чисельного аналізу свідчить про відповідну несучу здатність усіх частин стояна на всі розглянуті види сполучень з відповідним запасом міцності, що свідчить про нормальну експлуатацію в подальшому при незмінному стані інженерно-геологічних умов і навантажень.

### 3.2 Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту проміжної опори шляхопроводу і ґрунтової основи

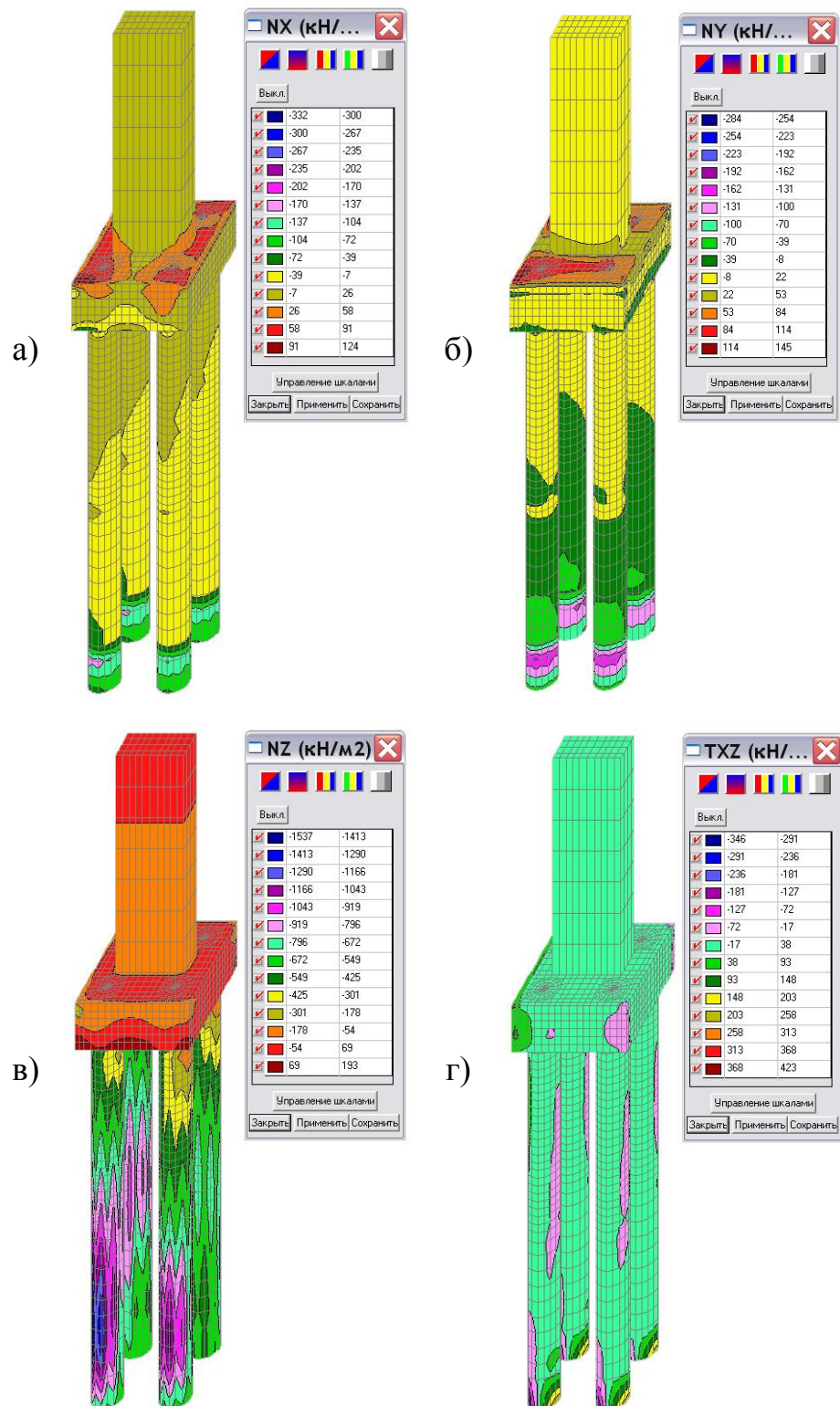


Рисунок 3.6 – Ізолінії та ізополя напружень в фрагменті моделі пальового фундаменту (дія власної ваги): а) нормальних по осі X (горизонтальна); б) нормальних по осі Y (поздовжня); в) нормальних по осі Z (вертикальна); г) дотичних в площині XZ

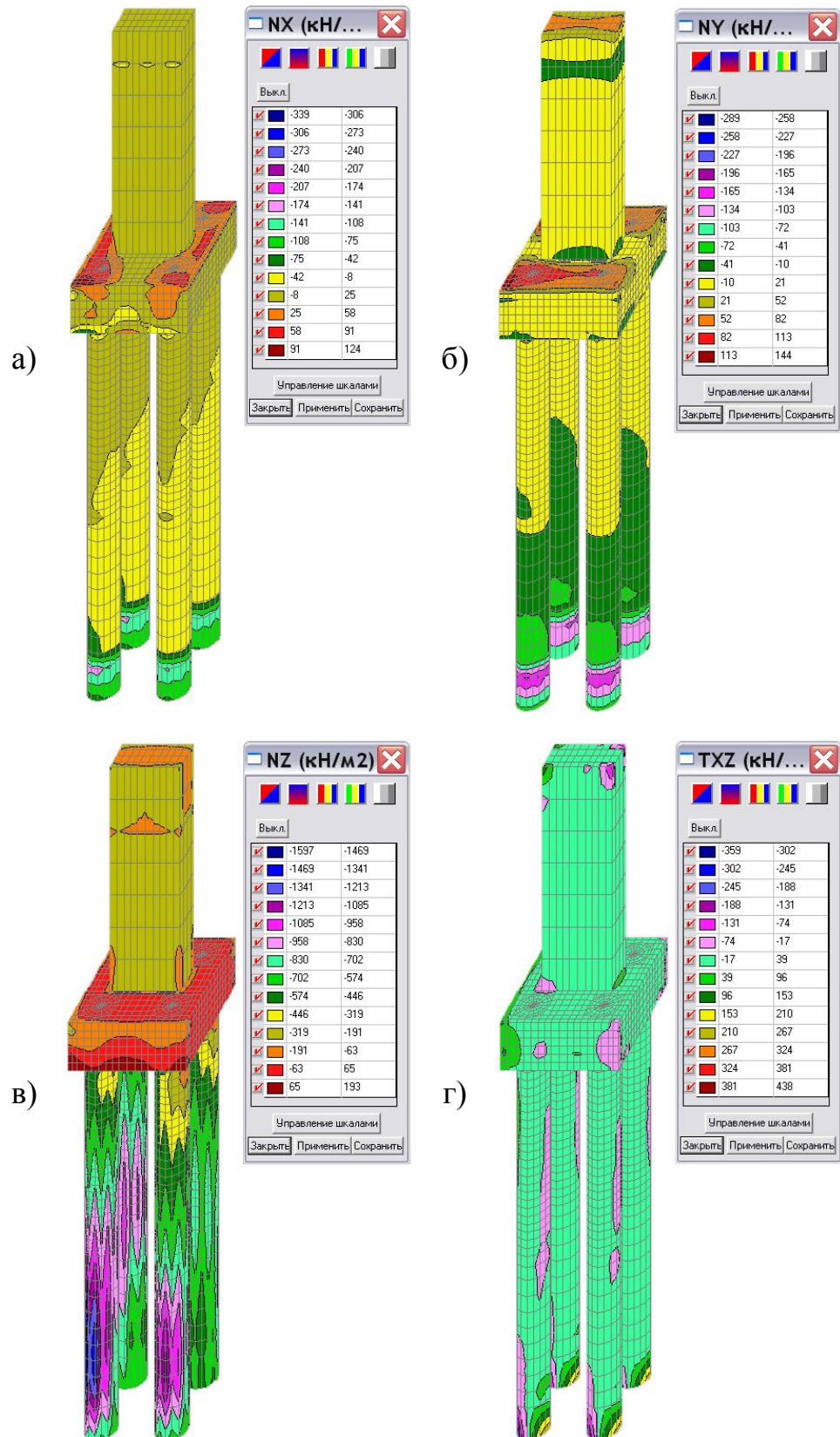


Рисунок 3.7 – Ізолінії та ізополя напружень в фрагменті моделі пальового фундаменту (перше сполучення): а) нормальних по осі X (горизонтальна); б) нормальних по осі Y (поздовжня); в) нормальних по осі Z (вертикальна); г) дотичних в площині XZ

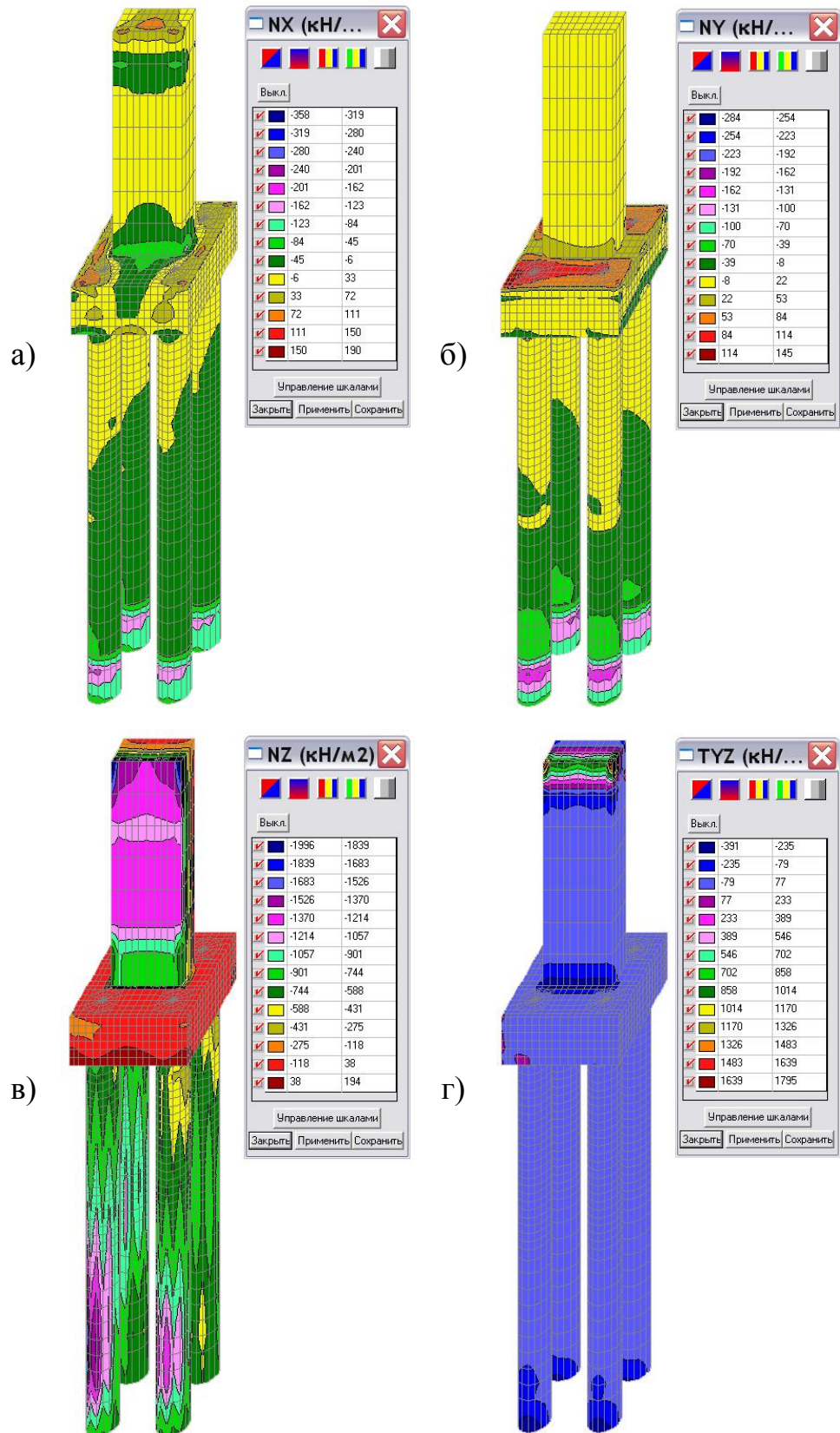


Рисунок 3.8 – Ізолінії та ізополя напружень в фрагменті моделі пальового фундаменту (друге сполучення): а) нормальних по осі X (горизонтальна); б) нормальних по осі Y (поздовжня); в) нормальних по осі Z (вертикальна); г) дотичних в площині XZ

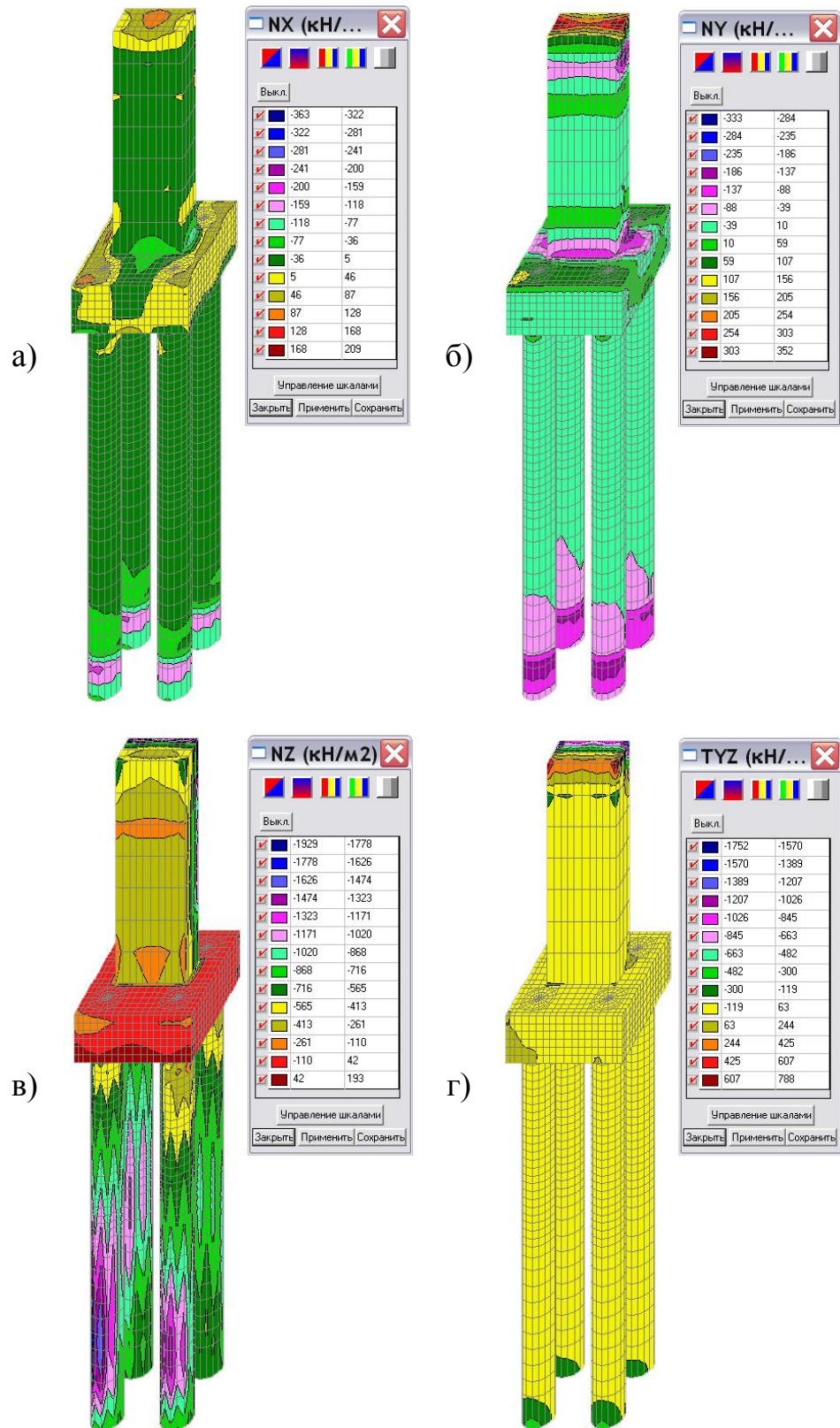


Рисунок 3.9 – Ізолінії та ізополя напружень в фрагменті моделі пальового фундаменту (третє сполучення): а) нормальних по осі X (горизонтальна); б) нормальних по осі Y (поздовжня); в) нормальних по осі Z (вертикальна); г) дотичних в площині XZ

На рис. 3.6-3.9 наведені основні параметри напруженого стану фундаменту опори шляхопроводу при дії власної ваги (для порівняння) та по сполученнях. Параметри деформованого стану не наведені, оскільки при їх презентації виникли деякі складності, які пов'язані із виключною однорідністю полів переміщень і їх незначним градієнтом в межах розрахункової області (долі міліметрів). Оскільки значення переміщень повністю відповідають вимогам норм, то аналізується лише напружений стан.

Найбільш напруженими елементами пальового фундаменту при дії власної ваги є палі (рис. 3.6, в), причому концентрація нормальних вертикальних напружень відбувається в нижній частині палі, що закономірно. Проаналізувавши значення всіх наведених компонент (рис. 3.5), слід відмітити, що достатньо компонентного аналізу без застосування еквівалентних напружень, оскільки максимальні напруження (вертикальні) складають 1,41...1,54 МПа, що у порівнянні із розрахунковим опором стиску  $R_b$  ( $R_b = [\sigma] = 21$  МПа для палі бетону класу С30/35), надає змогу свідчити про запас міцності в 14 разів.

Аналіз напруженого стану по трьом сполученням також свідчить про те, що компонентного аналізу достатньо (рис. 3.6-3.9). Картини напруженого стану змінюються незначно: для 1 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,47...1,60 МПа (запас міцності – 13 разів); для 2 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,84...2,0 МПа (запас міцності – 10,5 разів); для 3 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,78...1,93 МПа (запас міцності – 11 разів). Таким чином, матеріал палі бетон класу С30/35 повністю витримує усі види навантажень, представлених сполученнями.

Картини напруженого стану в ростверку наступні: для 1 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,10...1,20 МПа (запас міцності – 14 разів, при розрахунковому опорі стиску  $R_b$   $[\sigma] = 17$  МПа для ростверку бетону класу С25/30); для 2 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,40...1,5 МПа (запас міцності – 11,3 разів);

для 3 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,41...1,54 МПа (запас міцності – 11 разів). Таким чином, матеріал ростверку бетон класу С25/30 повністю витримує усі види навантажень, представлених сполученнями.

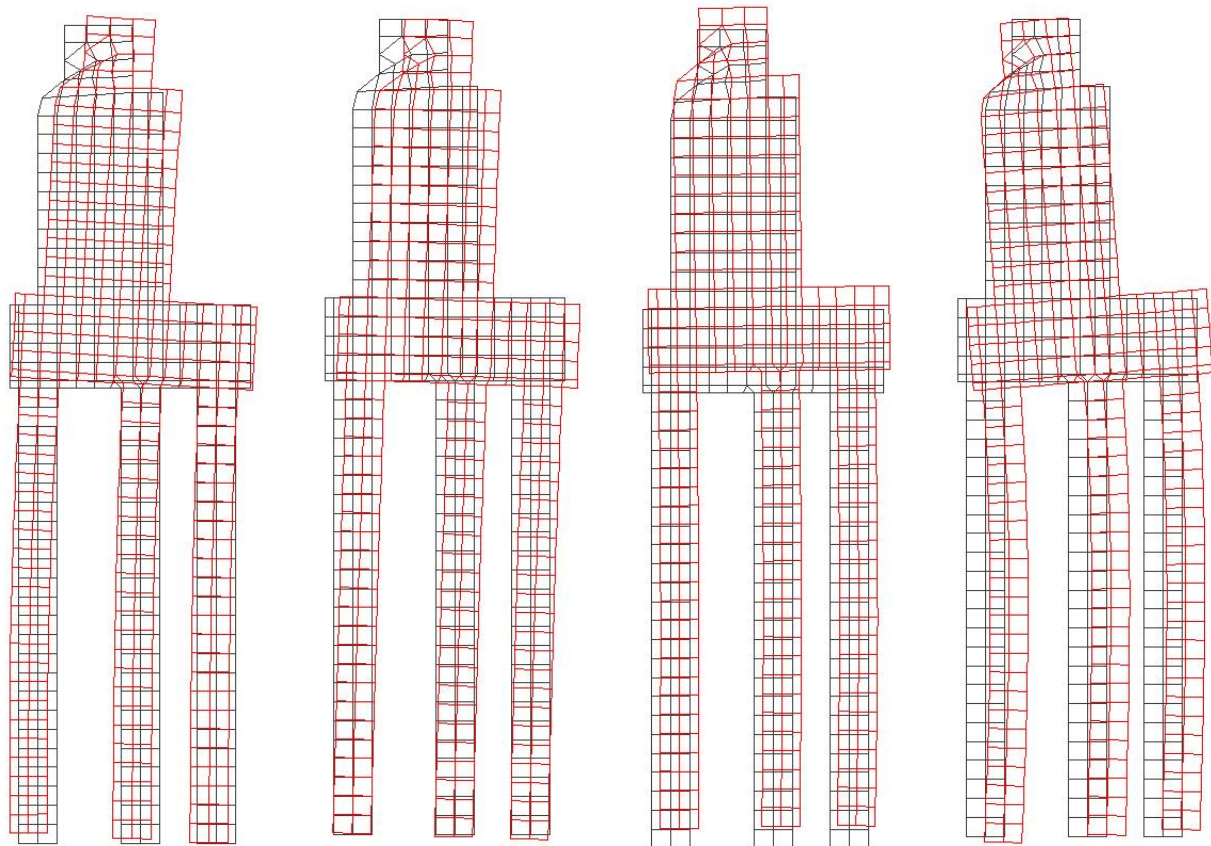
Для остаточного висновку про міцність системи «палі – ростверк» слід проаналізувати місце кріплення паль та ростверку, оскільки воно є концентратором напружень. Картини напруженого стану в місці кріплення паль та ростверку наступні: для 1 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 1,86...2,0 МПа (запас міцності – 8,5 разів, при розрахунковому опорі стиску  $R_b$   $[\sigma]=17$  МПа для ростверку бетону класу С25/30); для 2 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 2,1...2,3 МПа (запас міцності – 7,4 разів); для 3 сполучення значення максимальних напружень (вертикальні) складають 2,2...2,4 МПа (запас міцності – 7 разів). Таким чином, місце кріплення паль та ростверку бетон класу С25/30 повністю витримує усі види навантажень, представлених сполученнями.

Результатом проведеного аналізу НДС є висновок про нормальну несучу здатність усіх частин системи «палі – ростверк» на всі розглянуті види сполучень із максимальним напруженням 2,4 МПа (третє сполучення, місце кріплення паль та ростверку) і відповідним запасом міцності в 7 разів, що свідчить про нормальну експлуатацію в подальшому при незмінному стані інженерно-геологічних умов і навантажень.

### **3.3 Аналіз форм і частот власних коливань та динамічних напружень фундаменту стояна і ґрунтової основи**

Проведемо модальний аналіз скінченно-елементної схеми і перетворимо статичне навантаження від потягу в динамічне за допомогою коефіцієнту динамічності  $\mu=1,25$ .

На рис. 3.10 наведені вісім форм та належні їм частоти власних коливань стояна із основним тоном (1 форма) – 2,5 Гц.

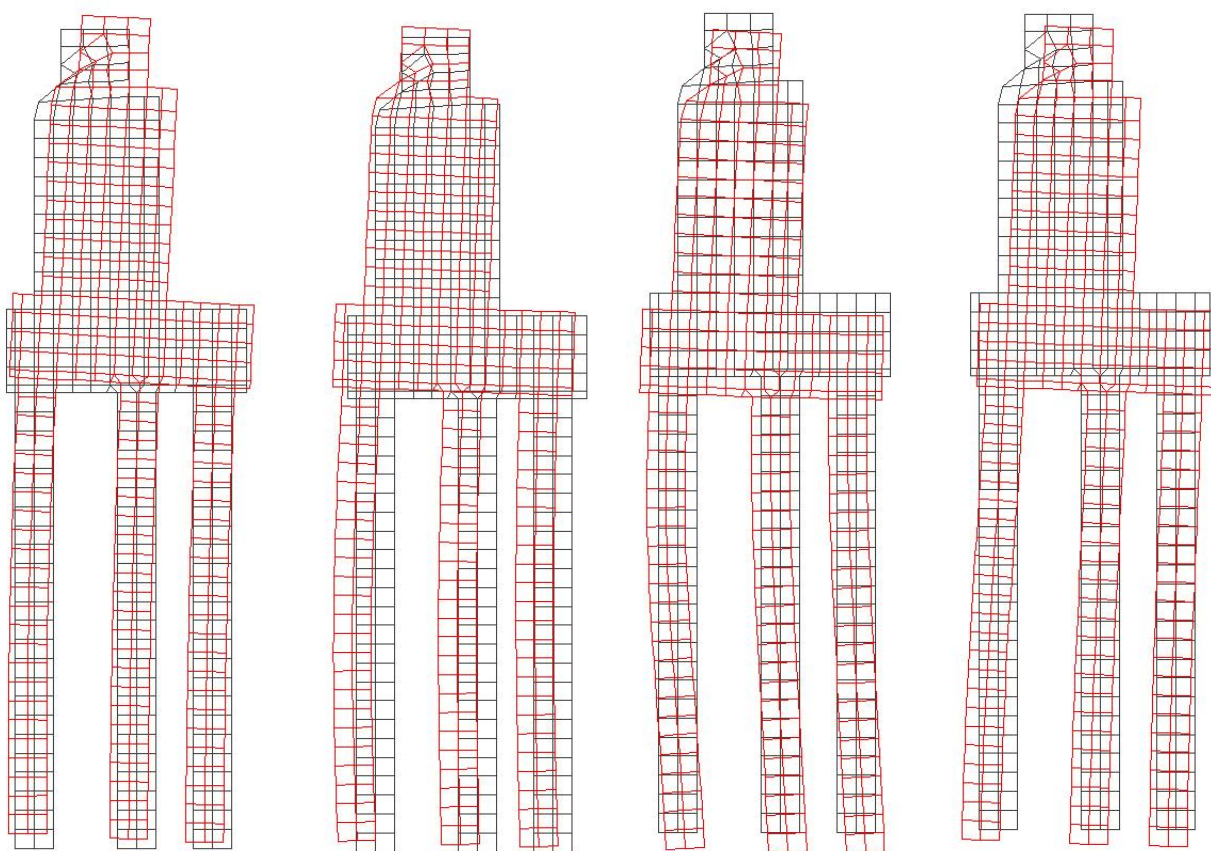


1 форма, 2,5 Гц

2 форма, 3,2 Гц

3 форма, 3,9 Гц

4 форма, 4,6 Гц



5 форма, 5,8 Гц

6 форма, 5,9 Гц

7 форма, 6,4 Гц

8 форма, 6,8 Гц

Рисунок 3.10 – Форми і частоти власних коливань стояна

На рис. 3.11-3.13 наведені вибрані параметри напружено-деформованого стану із урахуванням динамічного коефіцієнту по сполученнях.

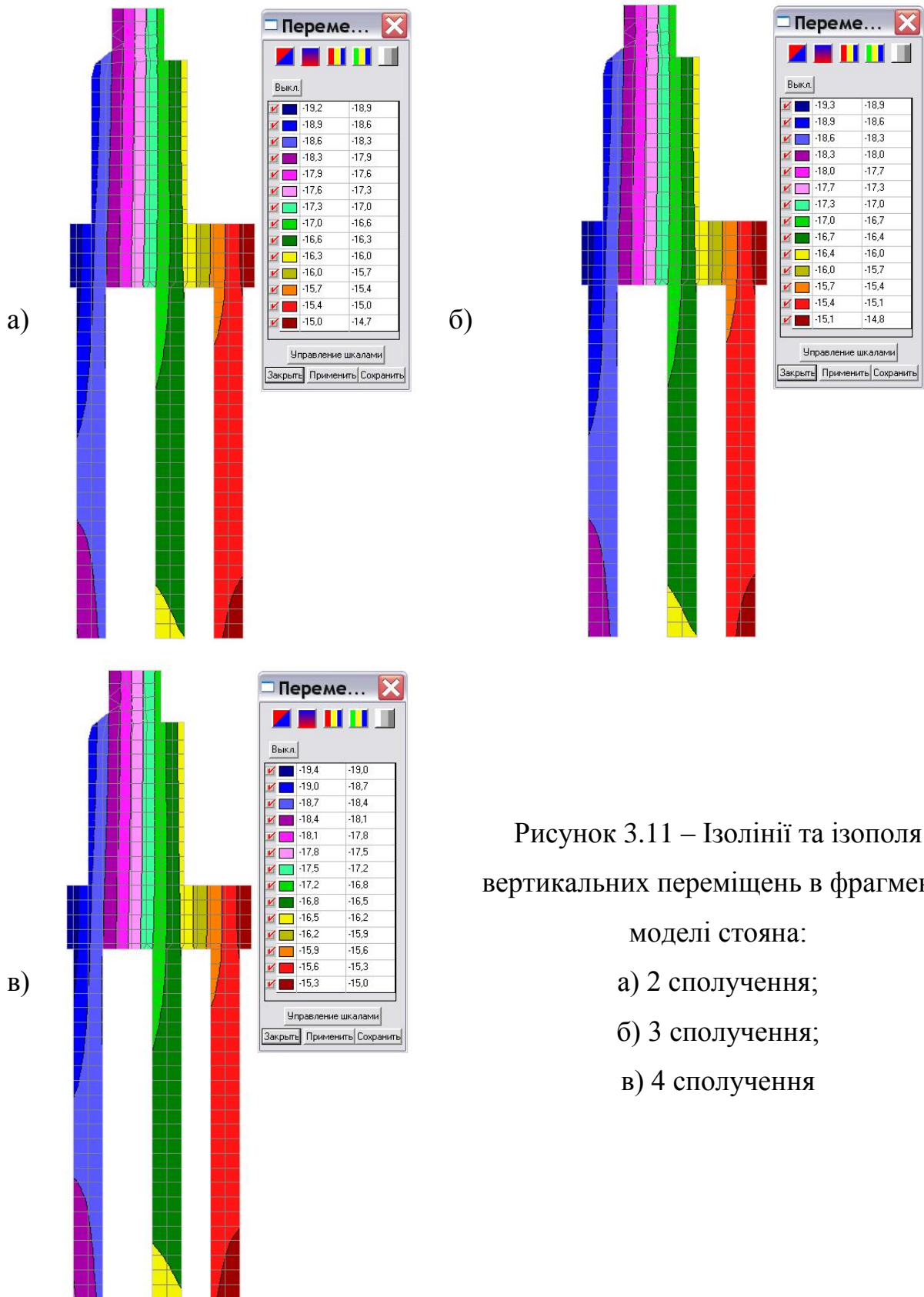


Рисунок 3.11 – Ізолінії та ізополя вертикальних переміщень в фрагменті моделі стояна:  
а) 2 сполучення;  
б) 3 сполучення;  
в) 4 сполучення

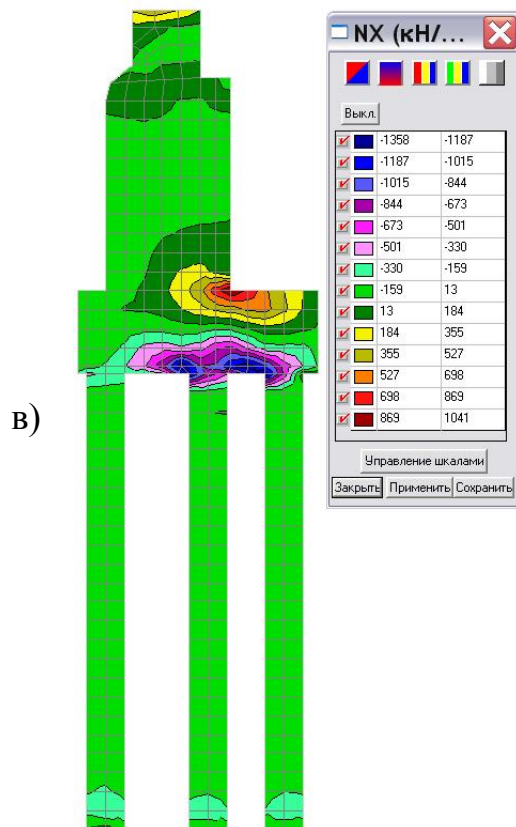
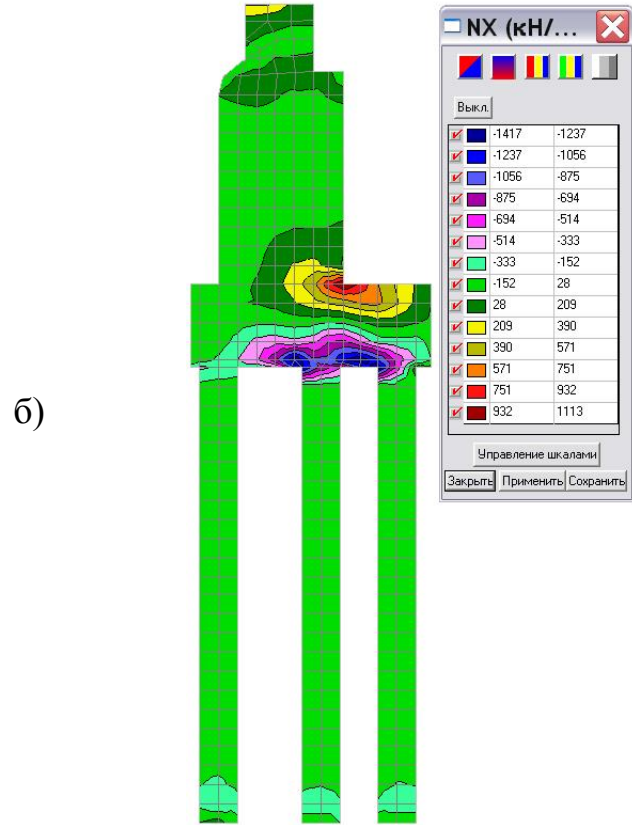
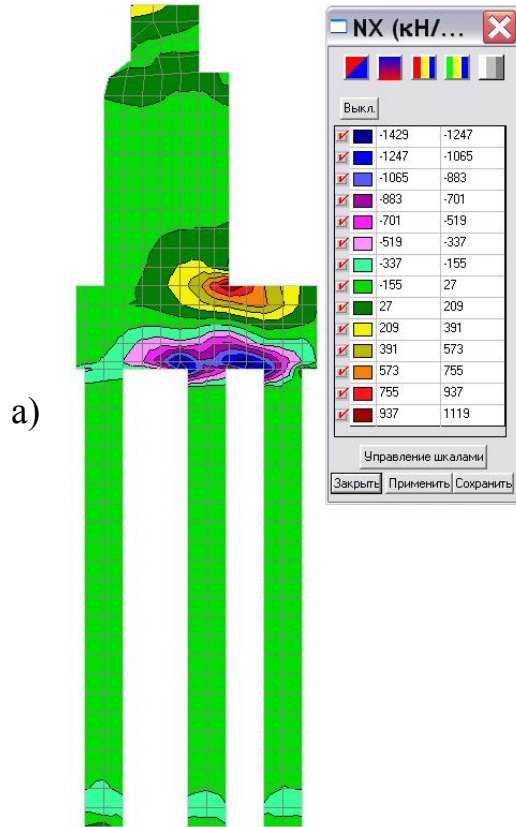


Рисунок 3.12 – Ізолінії та ізополя горизонтальних напружень в фрагменті моделі стояна:  
а) 2 сполучення;  
б) 3 сполучення;  
в) 4 сполучення

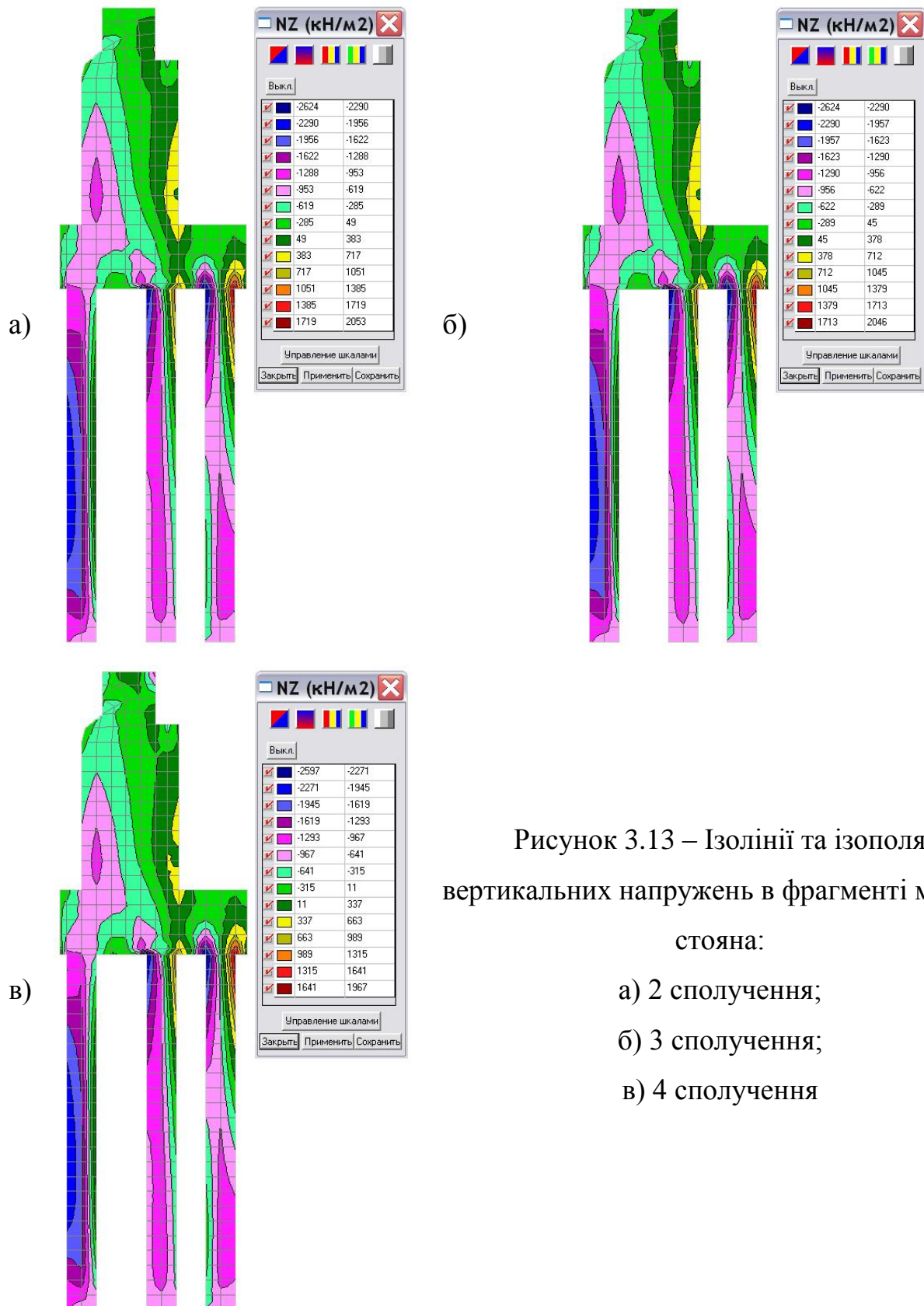


Рисунок 3.13 – Ізолінії та ізополя  
вертикальних напружень в фрагменті моделі

стояна:

а) 2 сполучення;

б) 3 сполучення;

в) 4 сполучення

Значення частот стояна для перших восьми форм знаходяться в діапазоні від 2,5 до 6,8, що свідчить про те, що у порівнянні із частотами розрідження

ґрунтів основи (від 50 Гц), вони значно менші, і розрідження не відбудеться. Явищем, яке може викликати резонанс конструкції стояна і зруйнувати її є лише землетрус із низькочастотним впливом (до 10 Гц).

Аналізуючи динамічні переміщення стояна від сполучень, слід відмітити, що їх значення від статичних відрізняються незначно (вертикальні статичні переміщення – 19,2 мм; динамічні – 19,4 мм, рис. 3.11), що свідчить про незначний вплив динамічної постановки.

Найбільш напруженими елементами пальового фундаменту залишаються ростверк (горизонтальні напруження, рис. 3.12) та палі (вертикальні напруження, рис. 3.13), причому слід відмітити, що динамічні напруження на відміну від статичних зросли приблизно в 1,1 рази: так для 2 та 3 сполучення значення максимальних динамічних напружень (вертикальні) складають 2,1...2,6 (статичні складала – 1,9...2,53 МПа, запас міцності не змінився – 8 разів); для 4 сполучення значення максимальних динамічних напружень (вертикальні) складають 1,9...2,60 МПа (статичні складала – 1,9...2,50 МПа, запас міцності не змінився – 8 разів). Таким чином, матеріал палі бетон класу С30/35 повністю витримує усі види навантажень, представлених сполученнями із урахуванням динамічного коефіцієнту.

Висновок чисельного аналізу свідчить про те, що зміна постановки задачі із статичної на динамічну для конструкції стояна збільшує параметри НДС незначно і її застосування може вважатися лише перевіроючим.

### **3.4 Аналіз форм і частот власних коливань та динамічних напружень фундаменту проміжної опори і ґрунтової основи**

Для проведення модального аналізу розроблена модель проміжної опори шляхопроводу мостового типу (рис. 3.14), яка представляє собою її половину і на її основі визначені частоти і форми його власних коливань. Об'єктивною причиною зменшення моделі в два рази є те, що модальний аналіз повної моделі був пов'язаний із труднощами апаратного характеру. Так файл SCAD при першій спробі модального аналізу, в якому міститься інформація про

динамічні переміщення вузлів схеми займав 12 Гб, що не підтримується системою FAT32, якою дискретизувало локальний диск із положенням папки з рішеннями SWORK.

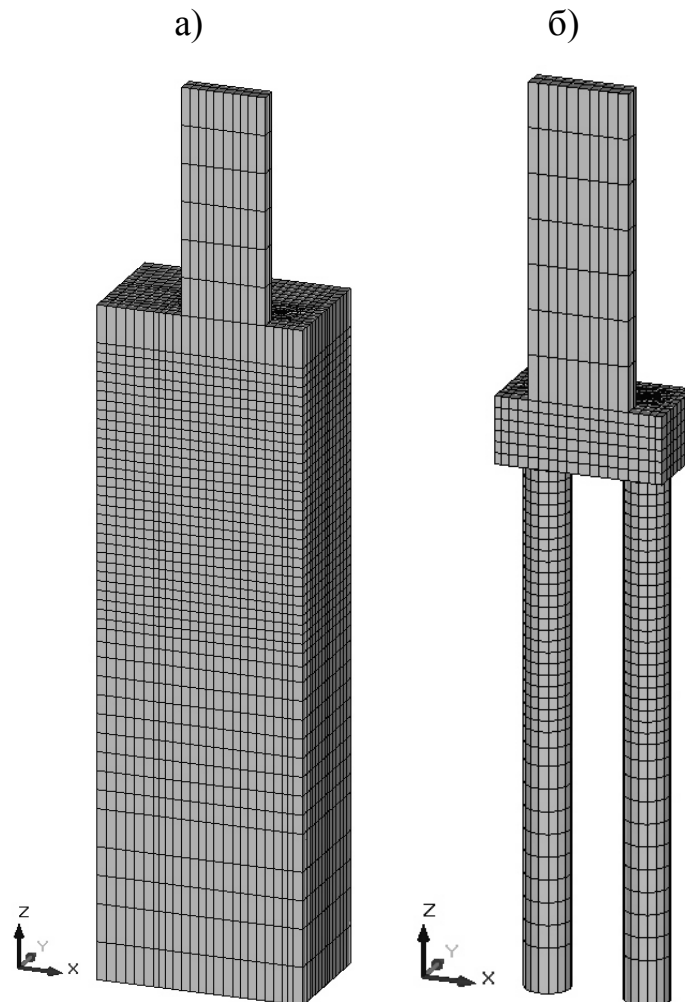


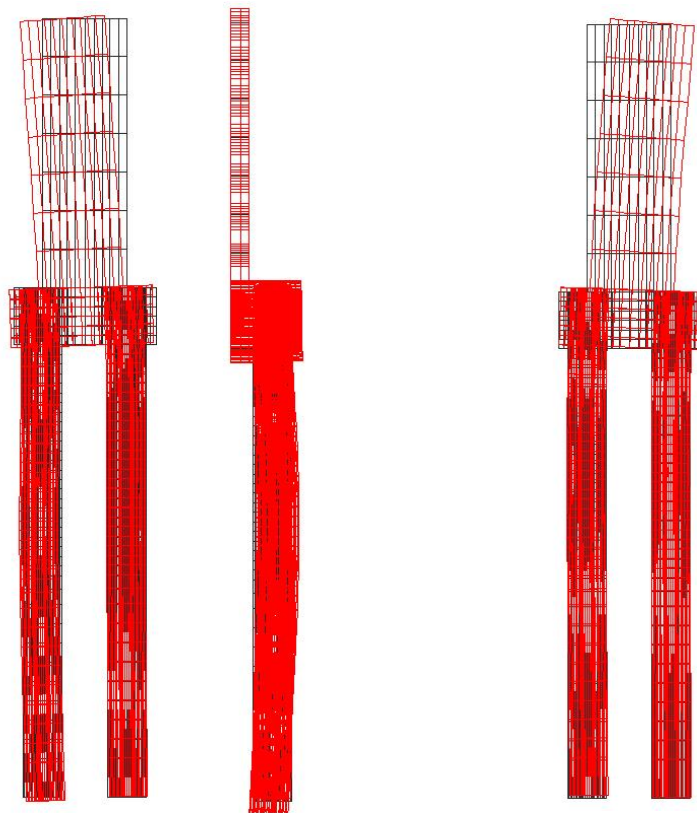
Рисунок 3.14 – Скінченно-елементна модель опори для модального аналізу:

а) загальний вигляд; б) фрагмент моделі – залізобетонні елементи

Перед проведенням модального аналізу слід було пам'ятати про можливу проблему, яка виникає при застосуванні половини моделі замість цілої. Проблема складається з того, що кососиметричні форми коливань випадають із модального аналізу внаслідок створення системи із площиною симетрії при розбиванні цілої моделі на дві половини. Але така проблема в подальшому буде вирішена за допомогою деякого прийому, який дозволить отримати форми, що не отримані.



1 форма, частота 4,2 Гц    2 форма, частота 10,7 Гц



3 форма, частота 14,1 Гц    4 форма, частота 15,8 Гц

Рисунок 3.15 – Схеми власних форм коливань  
з відповідними їм частотами

Кількість скінченних елементів – 22 522, вузлів – 23 886 (кількість ступенів свободи – 71 667). На рис. 3.15 наведені форми власних коливань фундаменту шляхопроводу мостового типа, який вичленована із загальної моделі в режимі презентаційної графіки, і показаний укрупнено для детальнішого аналізу. Одержані 4 вищі форми вільних коливань пальового фундаменту мостового шляхопроводу. Характер одержаних форм відображає його динамічну роботу, але значний проміжок між частотами першої та другої форм (4,2 та 10,7 Гц відповідно) свідчить про можливе випадіння форми коливань, які розвиваються відносно іншої осі симетрії.

Тому для перевірки створено ще одну половинну модель, розрахунок якої надасть можливості перевірки частоти, яка, можливо, зникла (рис. 3.16).

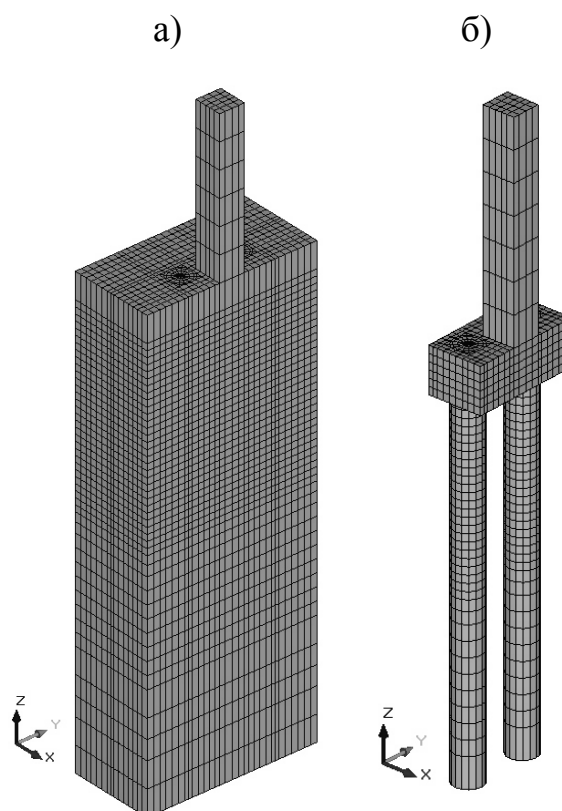
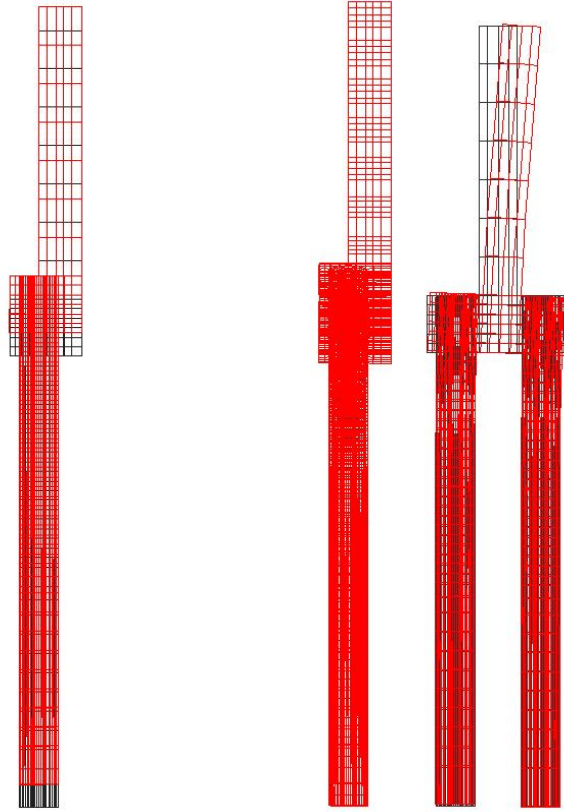


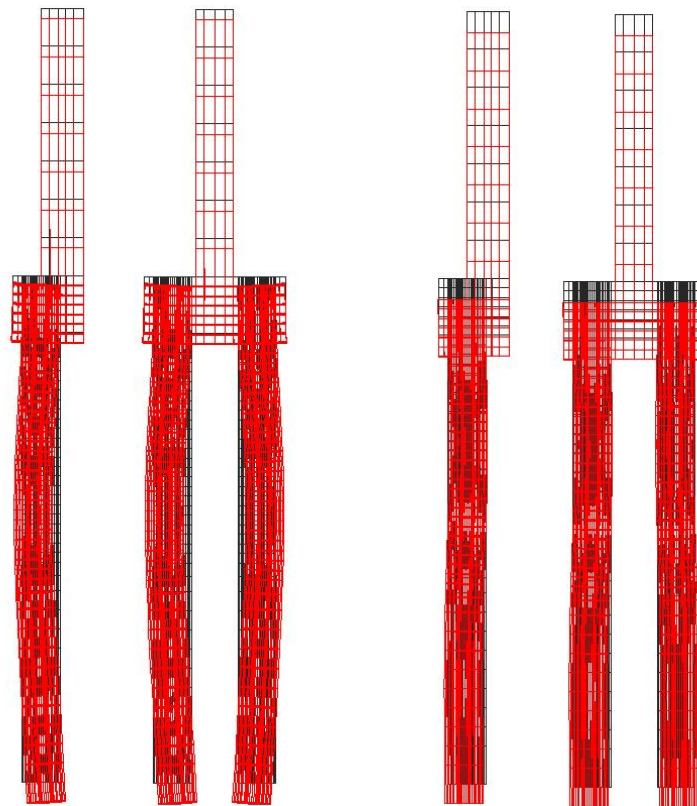
Рисунок 3.16 – Скінченно-елементна модель опори для модального аналізу:

а) загальний вигляд; б) фрагмент моделі – залізобетонні елементи

Кількість скінченних елементів – 25 972, вузлів – 27 628 (кількість ступенів свободи – 82 884). На рис. 3.17 представлені схеми власних форм коливань з відповідними їм частотами для другої моделі пальового фундаменту.



1 форма, частота 4,2 Гц    2 форма, частота 8,2 Гц



3 форма, частота 13,8 Гц    4 форма, частота 17,4 Гц

Рисунок 3.17 – Схеми власних форм коливань  
з відповідними їм частотами

З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що із першої половинної моделі фундаменту опори шляхопроводу випали, внаслідок розділення моделі для можливості проведення розрахунку, дві частоти – 8,2 та 13,8 Гц, а також з'явилася нова форма з дещо збільшеною частотою – 17,4 Гц. Таким чином, проаналізувавши дві половинні моделі, частоти і форми фундаменту наступні: 1 форма (основний тон) – частота 4,2 Гц (за обома моделями); 2 форма – частота 8,2 Гц (за другою моделлю); 3 форма – частота 10,7 Гц (за першою моделлю); 4 форма – частота 13,8 Гц (за другою моделлю); 5 форма – частота 14,1 Гц (за першою моделлю); 6 форма – частота 17,4 Гц (за другою моделлю).

Аналізуючи форми та частоти обох половинних моделей слід зазначити, що прогноз щодо випадіння форм повністю підтвердився, і тільки основний тон (перша форма з частотою 4,2 Гц) був присутній в обох моделях, що цілком закономірно [3, 5]. Коливання за першою формою є лінійними переміщеннями по вертикальній осі без якого-небудь згинання; друга форма (8,2 Гц) характеризується значним згинанням тіла опори в поздовжньому напрямі та деякими переміщеннями ростверку та паль по вертикальній осі, подібна їй третя форма (10,7 Гц) також характеризується згинанням, але в іншій, перпендикулярній 2 формі площині; найбільш інформативна з позиції її порівняння із частотами вібраційного розрідження пісків четверта форма (13,8 Гц), яка є парціальною формою паль (парціальна форма є формою лише відповідної частини конструкції, наприклад, паль, ростверку чи тіла опори). Але порівняння частоти 13,8 Гц з частотами розрідження вологих пісків (30...50 Гц) зрозуміло, що власні коливання опори не можуть викликати вібраційного розрідження, але для перевірки слід було б провести і динамічний розрахунок на гармонійне навантаження дії потягу, але динамічний розрахунок, навіть на половинній моделі, на ПЕОМ середнього класу виконати неможливо по причині малих розрахункових можливостей. Але і порівняння частот гармонійних коливань поїзду (до 20 Гц) при наявності значного впливу маси опори, яка дещо гасить коливання, можна свідчити, що розрідження не

відбудеться. П'ята форма (14,1 Гц) є дещо подібною до четвертої форми, але характеризується значними переміщеннями тіла опори на відміну від неї; шоста форма (17,4 Гц) є формою лінійних переміщень. Всі значення частот не є частотами розрідження вологих пісків.

Слід відмітити, що в проведеному модальному аналізі були враховані приєднані маси ґрунту оточуючого масиву, які зменшують частоту коливань на 1...2 Гц. Таким чином, частоти і форми пальового фундаменту без впливу приєднаних мас ґрунту приблизно наступні: 1 форма (основний тон) – частота 3,2 Гц (за обома моделями); 2 форма – частота 7,2 Гц (за другою моделлю); 3 форма – частота 9,7 Гц (за першою моделлю); 4 форма – частота 12,8 Гц (за другою моделлю); 5 форма – частота 13,1 Гц (за першою моделлю); 6 форма – частота 16,4 Гц (за другою моделлю).

Проведений модальний аналіз конструкції опори шляхопроводу мостового типу є першим етапом динамічного аналізу, оскільки з'ясування форм і частот власних коливань вважається першою задачею такого роду дослідження, і може бути основою для динамічного аналізу конструкцій шляхопроводів на гармонійне навантаження потягу або спектр дій.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані інженерно-геологічні умови спорудження шляхопроводу дали змогу зробити висновок про те, що ґрунти майже однакові за міцністю (середня, кут внутрішнього тертя 27...33 градуса) та деформаційною здатністю (незначні деформації, модуль пружності 48...75 МПа).

2. Розроблено методику чисельного аналізу системи «пальовий фундамент мостової опори – ґрунтова основа» з допомогою комплексу SCAD в статичній та динамічній постановках.

3. Виконано аналіз результатів напружено-деформованого стану фундаментів стояна і проміжної опори шляхопроводу із урахуванням поїзного навантаження в статичній постановці, який надав змогу отримати висновок про високу несучу здатність усіх частин системи «палі – ростверк» на всі розглянуті види сполучень із запасом міцності в 8 і 7 разів відповідно, що свідчить про нормальну експлуатацію в подальшому при незмінному стані інженерно-геологічних умов і навантажень.

4. Проведений модальний аналіз фундаментів стояна шляхопроводу свідчить, що отримані частоти і форми фундаменту, які дорівнюють 2,5 Гц (основний тон)...6,6 Гц. Проаналізувавши дві половинні моделі проміжної опори шляхопроводу отримані частоти і форми фундаменту, які дорівнюють 4,2 Гц (основний тон)...17,4 Гц (розподіл частот в залежності від форм є поліноміальною функцією четвертого порядку), а із порівняння цих частот з частотами розрідження вологих пісків (30...50 Гц) зрозуміло, що власні коливання опори не можуть викликати вібраційного розрідження.

5. Проведений аналіз напружено-деформованого стану фундаменту стояна із урахуванням поїзного навантаження в динамічній постановці свідчить про те, що він може вважатися перевірочним, оскільки зміна значень переміщень та напружень на відміну від статичної постановки незначна (1,1 рази).

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андреев, В. С. Математическое моделирование внецентренно нагруженных фундаментов на слоистых основаниях методом конечных элементов [Текст] / В. С. Андреев, А. Л. Тютькин, Т. А. Селихова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ: Вид-во ДІІТу, 2004. – Вип. 4. – С. 214-220.
2. Большаков, В. И. Основы метода конечных элементов [Текст] / В. И. Большаков, Е. А. Яценко, Г. Соссу и др. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2000. – 255 с.
3. Кушнер, С. Г. Расчет осадок оснований зданий и сооружений [Текст] / С. Г. Кушнер. – Київ: Будівельник, 1990. – 142 с.
4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Київ: Сталь, 2002. – 600 с.
5. Петренко, В. Д. Анализ проблемы исследования оснований транспортных сооружений при динамических воздействиях в сложных инженерно-геологических условиях [Текст] / В. Д. Петренко, Т. А. Селихова, А. Л. Тютькин // Міжвід. зб. наук. праць «Геотехнічна механіка». – Дніпропетровськ: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2004. – Вип. 50. – С. 63-69.
6. Петренко, В. Д. Численное моделирование состояния оснований транспортных сооружений [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютькин, С. В. Цепак, В. С. Андреев, Т. А. Селихова // Залізничний транспорт України, 2005. – № 2 (47). – С. 68-70.
7. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Математичне моделювання підземних споруд на основі методу скінченних елементів. Ч. 1. Structure CAD for Windows (SCAD)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютькін, В. П. Купрій. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2010. – 56 с.

8. Снітко, В. П. Проектування сталезалізобетонних мостів. Навчальний посібник [Текст] / В. П. Снітко. – Київ: НТУ, 2005. – 118 с.
9. Швець, В. Б. Справочник по механіке и динаміке ґрунтів [Текст] / под ред. В.Б. Швеца. – Київ: Будівельник, 1987. – 232 с.
10. Chen, Guoping A superelement simplified analysis of the vibration systems of the complex structures [Text] / Chen Guoping, Zhu Demao // J. Nanjing Aeronaut Inst. – 1992. – №1. – p. 19-26.
11. Gallo, Y. Structural modifications in dynamics with improvement of initial modelization [Text] / Y. Gallo, P. Level, Y. Ravalard // Euromech. Inst. Euro.Solid. Mech. Conf. Munchen. – 1991. – p. 86-90.
12. Givoli, D. Numerical methods for problem in infinite [Text] / D. Givoli. – Amsterdam, Domains, ELSEVIER, 1992. – 237 p.
13. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
14. Wand, Dajun A rough analysis of changes in frequencies due to changes in structural stiffness or masses [Text] / Wand Dajun // MedandPract. – 1984. – №5. – p. 48-50.