

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩІЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД**  
**«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**



**ТЮТЬКІН Олексій Леонідович**

**УДК 624.191.8.042/.044**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ**  
**ТУНЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Спеціальність: 05.15.04 – Шахтне та підземне будівництво**

**Автореферат**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2016**

**Дисертація є рукописом.**

Робота виконана на кафедрі тунелів, основ та фундаментів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор,  
**Петренко Володимир Дмитрович,**  
завідувач кафедри тунелів, основ та фундаментів  
Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гайко Геннадій Іванович,**  
професор кафедри геобудівництва і гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, доцент  
**Гапєєв Сергій Миколайович,**  
професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор  
**Харін Сергій Анатолійович,**  
професор кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Обласного комунального вищого навчального закладу «Інститут підприємництва "Стратегія"» (м. Жовті Води).

Захист відбудеться 15 квітня 2016 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 у Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Автореферат розісланий 15 березня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Подальший розвиток транспортних систем в мегаполісах викликає необхідність комплексного освоєння підземного простору з метою звільнення наземних площ і поліпшення умов життя. Окрім промислово-цивільного освоєння підземних об'єктів, урбанізація вимагає підвищених пасажироперевезень за рахунок створення мереж підземних розв'язок, систем тунелів і розвитку метрополітену. Разом із освоєнням підземного простору виникають проблеми, що пов'язані із застосуванням матеріало- і енергозберігаючих технологій, оскільки підземне будівництво є одним з найбільш витратних, як за об'ємами капіталовкладень, так і за трудовитратами. Тому зниження витрат є метою всіх етапів підземного будівництва – від початкового проектування та розробки технології спорудження до введення об'єкта в експлуатацію. Проте, якщо на етапі проектування можливість застосування абсолютно нових конструкцій зменшується за рахунок архітектурних рішень, що вже сформувалися, то на етапі науково-дослідних робіт застосування ресурсозберігаючих технологій можливе на основі проведення більш точного і детального аналізу тунельних конструкцій і, відповідно, розробки нових елементів з оптимальними параметрами. Іншим шляхом зниження витрат є розробка більш досконалих технологій будівництва, проте їх застосування без наукового обґрунтування впливу на підземний простір може призвести до аварійних ситуацій. Тому всесторонній комплексний аналіз тунельних конструкцій з отриманням детальних репрезентативних результатів напружено-деформованого стану (НДС) на різних стадіях досліджень, проектування, будівництва і експлуатації є важливим етапом для ухвалення вірних рішень в області підземного будівництва.

Рішенню проблеми аналізу НДС тунельних конструкцій присвячена велика кількість наукових робіт, проте загальний підхід, який поєднує в собі важливі прийоми вже проведених досліджень і надає можливість отримання достовірних результатів, не був розроблений, що пов'язано з відсутністю систематизованості і критичного розгляду існуючих методів і методик. Це пов'язано з труднощами дослідження системи «тунельна конструкція – оточуючий масив», оскільки взаємодія між її елементами надто неоднозначна, але безпосередньо впливає на загальний НДС.

Тому розробка теоретичних основ комплексного аналізу тунельних конструкцій на підставі результатів систематизації ефективних існуючих методик, а також нових підходів, критеріїв та закономірностей поведінки системи «тунельна конструкція – оточуючий масив», розглядаючи останній як в'язко-пружно-пластичне середовище, є актуальною проблемою, рішення якої дозволить одержати детальну інформацію про поведінку конструкцій, що досліджуються, та виконувати проектування транспортних підземних об'єктів, що має велике значення для комплексного освоєння підземного простору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до планів НДР Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

(ДНУЗТ) «Підвищення стійкості та жорсткості похилих виробок зі збірною залізобетонною обробкою в складних інженерно-геологічних умовах при будівництві Київського метрополітену» (№ держреєстрації (ДР) 0108U001841), «Оцінка напружено-деформованого стану ґрунтового масиву і обробки тунелів, що проходять щитовим способом та розробка заходів по забезпеченню нормативних умов проходки» (№ ДР 0106U006487), «Дослідження особливостей взаємодії оправи перегінних тунелів зі скельним масивом» (№ ДР 0108U001842), «Розробка конструкції відсічного екрану (два ряди свердловин із заповнювачем) із ефективними параметрами зниження рівня вібрації на дільниці Куренівсько-Червоноармійської лінії метрополітену м. Києва від станції "Либідська" до станції "Виставковий центр"», (№ ДР 0113U006230) і «Дослідження деформованого стану конструкцій перегінних тунелів метрополітену на дільниці переходу від спондилових глин до бучацьких пісків (стосовно до Подільсько-Вигурівській лінії у зоні станції "Глибочицька")» (№ ДР 0113U006231).

**Метою роботи** є розробка теоретичних основ комплексного аналізу тунельних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **основні задачі досліджень**:

- аналіз наукових робіт, проведених в досліджуваній області, визначення проблеми комплексного аналізу, рішення якої дозволить одержати більш повну і достовірну інформацію про поведінку системи «тунельна конструкція – оточуючий масив»;
- проведення лабораторних досліджень для визначення параметрів міцності та повзучості спондилової глини;
- розробка енергетичного підходу до визначення НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» для комплексного аналізу тунельних конструкцій та практичної реалізації для оточуючого масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища;
- розробка теоретичних основ критеріального аналізу напружень, деформацій і питомої енергії з урахуванням взаємодії в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив» для обґрунтування міцності її складових частин;
- практична реалізація математичних моделей різних тунельних конструкцій, адекватних реальним підземним спорудам, які базуються на розроблених теоретичних основах комплексного аналізу;
- порівняння результатів натурних досліджень деформування тунельних конструкцій з результатами математичного моделювання для визначення достовірності теоретичних положень, розроблених автором;
- розробка концепції комплексного аналізу тунельних конструкцій з обґрунтуванням динамічного аналізу для випадку імпульсних та ударних навантажень, а також поетапне моделювання прогресуючого руйнування;
- реалізація практичних основ чисельного моделювання тунельних конструкцій з урахуванням технологічних процесів для комплексного аналізу.

**Ідея роботи** полягає у застосуванні енергетичного підходу в аналізі напружено-деформованого стану тунельних конструкцій, які взаємодіють з

в'язко-пружно-пластичним масивом.

**Об'єктом дослідження** є взаємодія тунельних конструкцій з оточуючим в'язко-пружно-пластичним масивом та додатковими навантаженнями.

**Предметом дослідження** є параметри напружено-деформованого стану системи «тунельна конструкція – оточуючий масив».

**Методи досліджень.** Методологічну основу досліджень складає комплексний підхід, який включає аналіз літературних джерел, науково-технічних досягнень і виробничого досвіду з тематики досліджень, натурні маркшейдерські вимірювання деформацій в тунельних конструкціях, лабораторні дослідження зразків ґрунтів, виконані із залученням приладів одновісного та стабілометричного стиску, аналітичні дослідження із застосуванням методів термодинаміки, будівельної механіки, механіки твердого деформованого тіла, теорій пружності та пластичності, реології, теорії планування експерименту, математичної статистики та чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ).

#### **Наукові положення, що захищаються в дисертації.**

1. Критичний імпульс при ударних навантаженнях, що призводять до прогресуючого руйнування залізобетонних конструкцій колонних станцій мілкового закладення, знаходиться в межах 9000...12000 кН·м/с, що дозволяє визначати відстань між колонами, яка забезпечує міцність таких конструкцій в процесі експлуатації.

2. При сумісній дії статичних і динамічних навантажень на систему «тунельна конструкція – оточуючий масив» при мілкому і глибокому закладенні напруження і переміщення в оправах змінюються лінійно (при коефіцієнті кореляції не менше 0,98) незалежно від енергетичного рівня дій, що дозволяє обґрунтовано ухвалювати проектні рішення за складних умов роботи підземної споруди.

3. Вертикальні і горизонтальні переміщення, що виникають в залізобетонних елементах колонних станцій глибокого закладення під час будівництва, сягають максимальних значень на стадії розкриття калоти середньої зали і в 2,9 і 3,4 рази перевищують ті ж параметри в експлуатаційному стані, що вимагає обов'язкового розрахунку колонних станцій з урахуванням технології їх спорудження.

#### **Наукова новизна отриманих результатів досліджень.**

1. Для вирішення задачі визначення НДС оточуючого масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища застосовано принцип накладення деформацій, який дозволив враховувати як пружно-пластичні деформації, так і деформації, пов'язані з реологічними явищами. Для вирішення цієї задачі розроблена методика розділення деформацій відповідно до принципу їх накладення.

2. Вперше розроблені теоретичні основи енергетичного підходу до аналізу НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив», причому залежності енергії отримані для пружно-пластичної деформації і реологічних явищ.

3. Розроблені основи динамічного аналізу як частини комплексного аналізу для тунельних конструкцій, що взаємодіють з оточуючим масивом, які дозволяють визначити частоти і форми власних коливань в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив» при імпульсних і ударних навантаженнях.

4. Вперше отримані результати чисельного аналізу, які доводять важливість проведення розрахунків міцності різних тунельних конструкцій з урахуванням технологічних процесів.

5. Вперше детально розроблені теоретичні положення енергетичного підходу для дослідження імпульсної дії на тунельні конструкції, які дозволяють за рівнем питомої енергії визначати зони деформування та втрати стійкості системи у разі прогресуючого руйнування.

6. Вдосконалені теоретичні положення розрахунку тунельних конструкцій на основі математичного моделювання, адекватність яких доведено порівнянням результатів натурних досліджень та чисельного аналізу, причому відхилення складало 11...20 %.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується застосуванням фундаментальних положень механіки суцільного середовища, механіки ґрунтів і будівельної механіки в теоретичних дослідженнях; виконанням вимог Державних стандартів при проведенні лабораторних і натурних випробувань; використанням ліцензійного розрахункового комплексу в чисельному математичному моделюванні і підтверджено задовільною збіжністю одержаних результатів чисельного аналізу та результатів натурних досліджень (різниця не перевищує 20 %).

**Наукове значення роботи** полягає в розробці теоретичних основ комплексного аналізу тунельних конструкцій та встановленні на їх основі нових закономірностей напружено-деформованого стану підземних споруд при їх взаємодії з оточуючим масивом як в'язко-пружно-пластичного середовища та широкому спектрі зовнішніх навантажень.

**Практичне значення роботи** полягає:

- у розробці методики комплексного аналізу НДС трьохсклепінчастих станцій метрополітену глибокого та мілкового закладення з урахуванням пружно-в'язко-пластичних властивостей масиву;
- у розробці методики визначення НДС ескалаторних тунелів зі збірною залізобетонною оправою при будівництві Київського метрополітену та розробці рекомендацій щодо підвищення їх стійкості та жорсткості;
- у розробці методики та визначенні НДС ґрунтового масиву і оправи тунелів, що проходять щитовим способом;
- у проведенні комплексного статико-динамічного аналізу реального перегінного тунелю між станціями «Либідська»–«Диміївська» та на Подільсько-Вигурівській лінії Київського метрополітену;
- у розробці рекомендацій зниження рівня вібрації на дільниці Куренівсько-Червоноармійської лінії між станціями «Либідська»–«Виставковий центр».

**Реалізація висновків і рекомендацій роботи.** Результати досліджень реалізовані Державною корпорацією «Укрметротунельбуд» (м. Київ) у вигляді методик дослідження НДС тунельних конструкцій та рекомендацій щодо покращення їх будівництва та експлуатації, що дало можливість отримати економічний ефект у розмірі 419 970 гривень. Впровадження теоретичних і практичних результатів роботи реалізовано в навчальному процесі ДНУЗТу в курсах дис-

циплін «Тунелі і метрополітени», «Механіка підземних споруд» і «Математичні моделі взаємодії ґрунтового масиву з оправою тунелів».

**Особистий внесок автора.** Автор самостійно сформульовані наукова проблема, ідея, мета і завдання досліджень, наукові положення, висновки і рекомендації; виконаний аналіз літературних джерел, обрані методи досліджень, розроблені математичні моделі та удосконалені підходи до чисельного моделювання, програми лабораторних та натурних досліджень. Автор брав безпосередню участь в лабораторних дослідженнях, у виконанні чисельного моделювання, в розробці технічних рішень і впровадженні результатів у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення, результати і зміст роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2006-2008), «Роль механіки в створенні ефективних матеріалів, конструкцій і машин ХХІ века» (Омськ, РФ, 2006), «Математичні моделі процесів у будівництві» (Залізобетонні конструкції та матеріали) (Луганськ, 2007), «Проблеми теорії споруд, проектування, будівництва та експлуатації мостів» (Київ, 2008), «Нові технології підземного будівництва та видобування корисних копалин» (Алчевськ, 2008), «Геомеханіка. Механіка підземних споруд» (Тула, РФ, 2008-2009), «Развитие городов и геотехническое строительство» (Санкт-Петербург, РФ, 2008), науково-практичних конференціях «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2005-2015), «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения» (Гаспра, 2006-2008), «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (Дніпропетровськ, 2007; 2010), науково-практичному симпозіумі «Современные проблемы шахтного и подземного строительства» (Алушта, 2006), науково-практичних семінарах «Прогрессивные технологии строительства, безопасности и реструктуризации горных предприятий» (Донецьк, 2005), «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» (Київ, 2006), «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій» (Дніпропетровськ, 2009) та науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Перм, РФ, 2014).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладені в 69 наукових працях, в т.ч. 3 монографії, 42 статті, опубліковані у спеціалізованих наукових виданнях (з них 3 – в зарубіжних періодичних виданнях, 2 – в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз), і 24 статті, опубліковані у збірках матеріалів конференцій та інших виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури з 230 найменувань на 23 сторінках і восьми додатків на 9 сторінках. Містить 269 сторінок машинописного тексту, в тому числі 158 рисунків і 29 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 366 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладені об'єктивні характеристики дисертаційної роботи: її актуальність, зв'язок з науковими програмами, планами, темами, мета і задачі досліджень; визначені ідея, об'єкт, предмет і методи досліджень. Також наведені положення обґрунтованості і достовірності теоретичних досліджень, розроблених в дисертаційній роботі, одержаних результатів, висновків і рекомендацій, їх наукова новизна і практичне значення. Наведені дані про публікації і апробацію роботи, особистий внесок автора, визначена структура та обсяг роботи.

**Перший розділ** присвячений огляду стану питання і постановки проблеми комплексного аналізу тунельних конструкцій. У ньому визначені основні напрями і тенденції дослідження тунельних конструкцій та проведений аналіз методів розрахунку їх напружено-деформованого стану при взаємодії з оточуючим масивом. Для подальшого обґрунтованого застосування теоретичних положень, які розробляються в роботі, був проаналізований генезис як різних методів розрахунку з їх оригінальними моделями і розрахунковими схемами, так і положення більш глибокого дослідження поведінки тунельних конструкцій при взаємодії з оточуючим масивом, які ґрунтуються на принципах механіки суцільного середовища, причому відмічено, що деякі положення так і не стали інженерними методиками внаслідок великої математичної складності. З'ясовано, що розвиток розрахункових методів, які впроваджуються в теорію і практику проектування і розрахунку тунельних конструкцій, дозволяє здійснювати розробку нових методик їх дослідження, які дають репрезентативну інформацію про їх поведінку.

Результати аналізу створення моделей, який був проведений при розгляді моделей пілонної станції глибокого закладення, дозволив визначити не тільки тенденцію розвитку чисельного моделювання МСЕ, але і з'ясувати переваги і недоліки даних моделей. Деякі автори, порівнюючи чисельні і аналітичні методи, відзначають, що останні дають можливість отримання рішень в замкнутому вигляді, тоді як перші реалізують рішення конкретних задач, які надалі не можуть бути поширені на подібні задачі із зміненими параметрами. Проте, отримання замкнутого рішення аналітичним методом, який вимагає для його реалізації введення в модель і умови розрахунку значної кількості спрощень, менш важливе для практичних розрахунків тунельних конструкцій, ніж отримання конкретного рішення МСЕ для певного об'єкту, в ході якого враховано більшість особливостей конструкції, інженерно-геологічних умов і взаємодії в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив». Проаналізовані роботи Ю. М. Айвазова, Б. З. Амусіна, І. В. Баклашова, С. Н. Беркіної, Б. П. Бодрова, О. Ю. Бугаєвої, М. С. Буличова, С. М. Гапєєва, С. С. Давидова, Б. А. Картозія, А. Лабасса, Ю. М. Лібермана, С. О. Орлова, Д. В. Руппенейта, А. М. Саммаля, О. О. Сдвижкової, Р. Феннера, Н. Н. Фотієвої, О. М. Шашенка та інших авторів надали можливість визначити межі проблеми визначення НДС в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив».

Окрім загальної постановки проблеми, в першому розділі надана увага те-



оретичним дослідженням НДС оточуючого масиву із складними властивостями, наприклад, в'язко-пружно-пластичними, оскільки взаємодія масиву і тунельної конструкції є основним процесом, який формує сукупний НДС. Проаналізовані роботи А. К. Бугрова, Ю. А. Векслера, С. С. Вялова, Г. І. Гайка, В. Т. Глушка, М. Н. Гольдштейна, В. В. Жиховіча, Ю. К. Зарецького, М. М. Маслова, В. А. Мізюмського, П. Пежина, Ю. М. Работнова, П. А. Ребіндера, М. Рейнера, Н. К. Русинко, Г. М. Савіна, О. О. Сдвижкової, А. Н. Спорихіна, А. Б. Фадєєва, С. А. Харіна, О. М. Шашенка, Р. В. Attewell, S. Zahorski дали можливість зробити висновки про складність проблеми визначення НДС середовища із в'язко-пружно-пластичними властивостями, наприклад, глинистого масиву, яка не одержала систематично оформленого виду теорії, як і достатньої практичної реалізації. Причиною цього є складність одночасного урахування всіх властивостей середовища в одній математичній моделі, що спричиняє введення додаткових гіпотез і припущень, які, спрощуючи модель і дозволяючи привести теорію до практичної реалізації, опускають важливі властивості середовища і особливості її поведінки. Тому в підрозділі, присвяченому цьому питанню, наведені передумови подальших теоретичних побудов і їх практичної реалізації.

В процесі аналізу літературних джерел відмічено, що велику актуальність мають дослідження НДС тунельних конструкцій при складному комплексі навантажень, включаючи особливе поєднання. Це обумовлено тим, що розрахунків НДС на постійне і тимчасове поєднання недостатньо, оскільки вплив особливої дії все частіше спостерігається в роботі тунельних конструкцій, зокрема споруд метрополітену глибокого і мілкового закладення – станцій і перегінних тунелів. Відмічена важливість проведення динамічних розрахунків тунельних конструкцій, проте визначена і недостатня їх розробка, як на теоретичному, так і на практичному рівні. Визначено, що область динамічних дій для станцій метрополітену класифікують таким чином:

1. Динамічна дія метропоїзду, яка є періодичною дією, що впливає на оправу і оточуючий масив із такими наслідками як віброкомпресія, віброповзучість і посилення корозії бетону. Динамічна дія метропоїзду, виявляється у всіх тунельних конструкціях, незалежно від глибини закладення.

2. Динамічна дія наземного транспорту, яка найактивніше впливає на станційні конструкції мілкового закладення, найчастіше виявляється на станціях одноклепінчастого і колонного типів (глибина закладення не більш 20 метрів).

3. Ударна динамічна дія у разі падіння мас в межах тунельної конструкції. Даний вид дії також активніше впливає на станційні конструкції мілкового закладення, проте деякі специфічні випадки ударної дії (наприклад, падіння літальних апаратів) також можуть впливати і на станції глибокого закладення (глибина закладення більше 20 метрів).

4. Імпульсна динамічна дія (вибухове або іншого характеру). Даний вид дії мало вивчений при розрахунках станційних конструкцій, проте є актуальним для вирішень при розрахунках на особливі дії.

5. Сейсмічна динамічна дія. Розрахунки на дію землетрусів виділилися в окрему область аналізу тунельних конструкцій і найбільш розроблені і систе-

матизовані.

6. Динамічна дія тектонічних процесів земної кори. Даний вид дії вивчений менш усього, оскільки складність у визначенні тектонічних сил, їх виникнення, формування і поведінки, полягає не тільки в отриманні аналітичних залежностей, але і в подальшому їх використуванні в практичних розрахунках.

Особливої уваги приділено розгляду і аналізу робіт з дослідження НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» з урахуванням технології спорудження. Зроблено висновок про те, що рішення задач динамічного аналізу тунельних конструкцій, як і задач впливу технологічних процесів, знаходиться на початковій стадії і вимагає розробки нових концептуальних принципів дослідження, які можливі лише при застосуванні комплексного аналізу.

**Другий розділ** присвячений експериментальним дослідженням міцності тунельних конструкцій, а також розробці теоретичних основ визначення міцності тунельних конструкцій при взаємодії з в'язко-пружно-пластичним масивом.

Були визначені закономірності деформування глинистого ґрунту під навантаженням і в часі (спонділова глина, інженерно-геологічні умови Київського метрополітену), для чого були проведені його одновісні і стабілометричні (тривісні) випробування на міцність і повзучість та побудовані діаграми деформування під навантаженням (рис. 1).

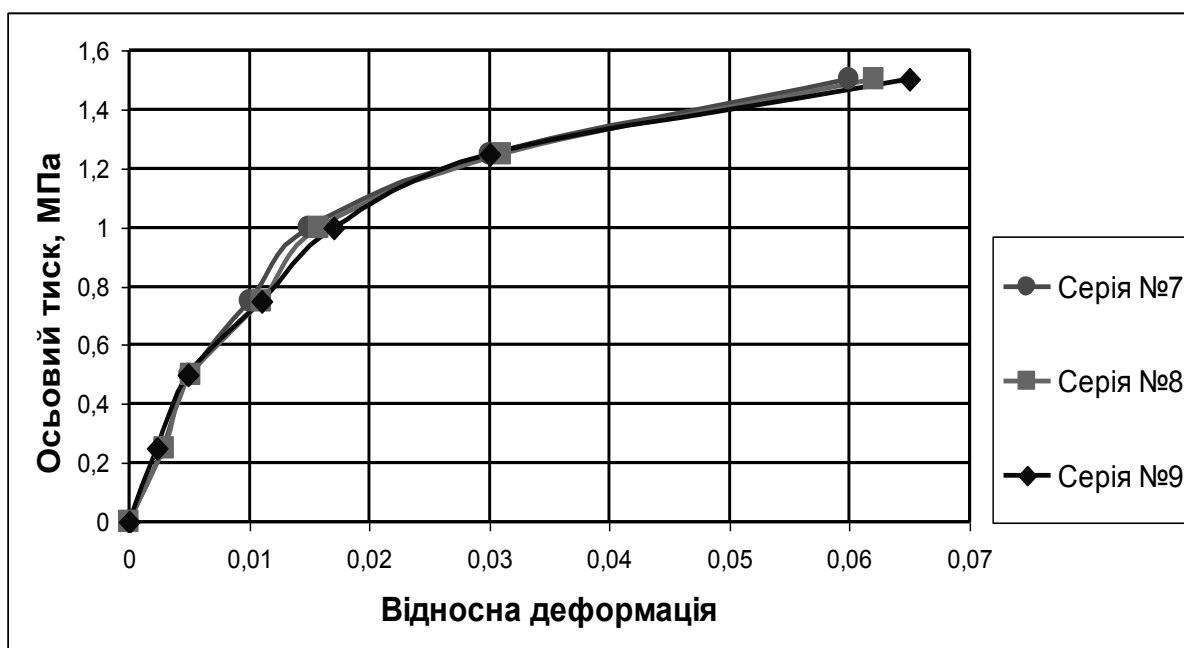


Рис. 1. Діаграми стабілометричних досліджень спонділової глини на міцність

Проведено одновісні і стабілометричні дослідження спонділової глини на повзучість (рис. 2, наведено характерний графік стабілометричних випробувань на повзучість). В комплексі із результатами випробувань на міцність, отримані дані є достатніми для того, щоб визначити основні характеристики під час пружно-пластичного деформування і у випадку повзучості й в подальшому імітувати ці процеси при проведенні математичного моделювання.

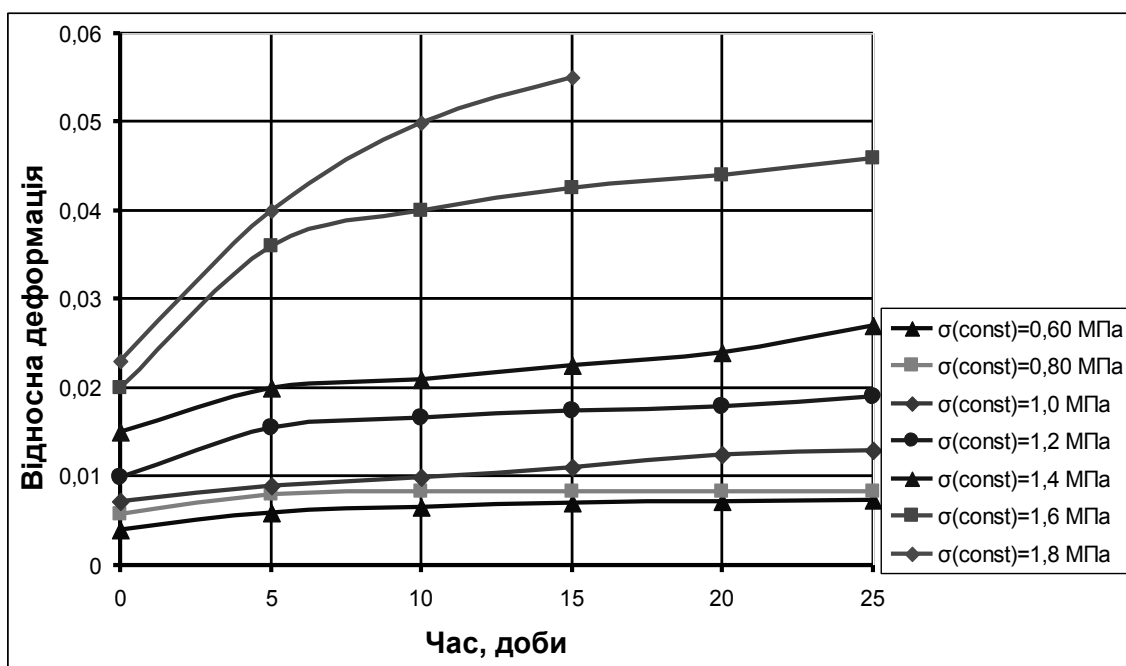


Рис. 2. Діаграми стабілометричних випробувань спондилової глини на повзучість

Для практичного розділення умовно-миттєвих деформацій для сімейства кривих повзучості були побудовані ізохронні криві, характер яких дає можливість отримання енергії деформації у випадку реологічних явищ.

У наданому розділі на основі проведеного комплексу досліджень ґрунту доведено можливість застосування принципу накладення пружних, пластичних і в'язких деформацій, тобто доведено їх взаємоне впливаючий характер, звідки слідує можливість застосування принципу накладення деформацій. У подальших теоретичних побудовах для реалізації принципу накладення прийнято взаємну незалежність деформацій, викликаних окремою реологічною властивістю, що надало можливість застосувати результати лабораторних досліджень.

Враховуючи принцип накладення деформацій, значення загальної деформації складається з трьох компонент:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^v + \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{ij}$  – загальний тензор деформацій;  $\varepsilon_{ij}^v$ ,  $\varepsilon_{ij}^e$ ,  $\varepsilon_{ij}^p$  – в'язкий, пружний і пластичний компоненти загального тензора відповідно.

Для того, щоб реалізувати теоретичні рішення деформування глинистого ґрунту як в'язко-пружно-пластичного середовища, прийнято феноменологічний підхід, що полягає у пошуку закономірностей, які слід практично реалізувати за допомогою комплексу експериментальних досліджень. Для практичної реалізації визначеного принципу накладення деформацій слід скористатися графіком сімейства повзучості. Розділення пружно-пластичної компоненти  $\varepsilon_{(e+p)}$  на пружну  $\varepsilon_e$  і пластичну  $\varepsilon_p$  можливо після розвантаження зразка за методикою, що розроблена в дисертації. Сутність методики полягає в представленні сімейс-

тва кривих повзучості в просторовому вигляді (у координатах  $\sigma-\varepsilon-t$ , рис. 3).

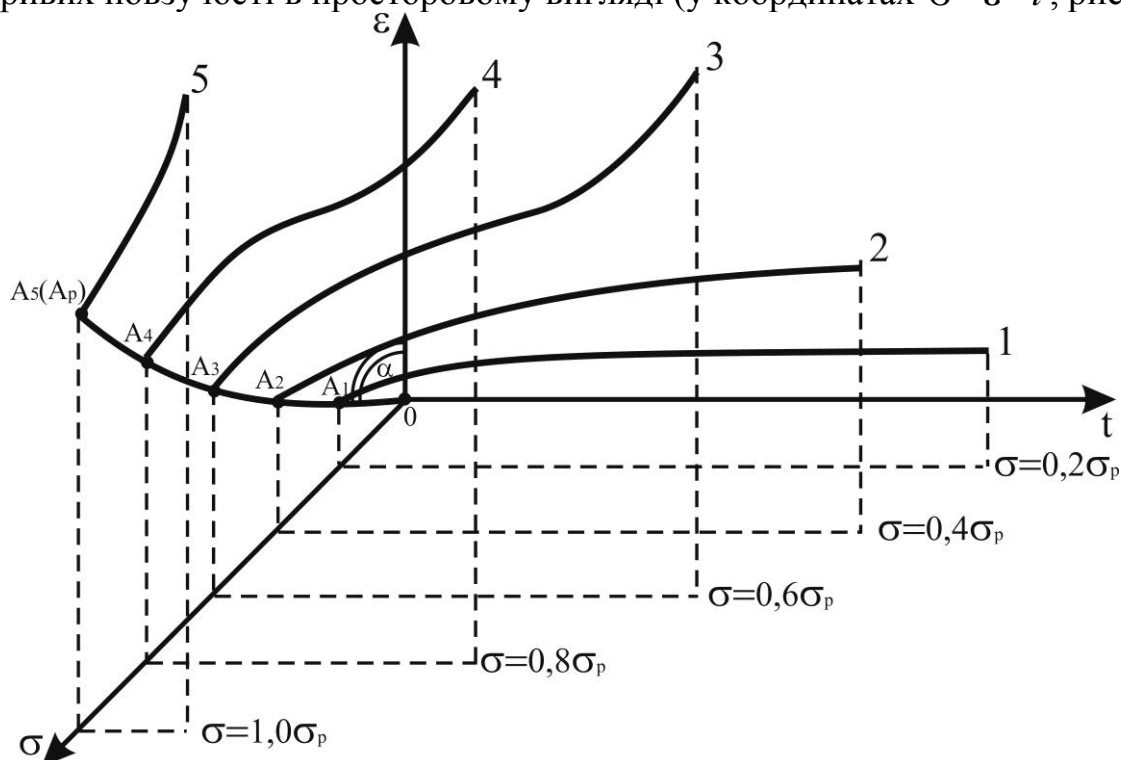


Рис. 3. Сімейство кривих повзучості в координатах  $\sigma-\varepsilon-t$

Як видно з цього графіку, початки кривих повзучості 1–4, побудованих при постійних напруженнях в частках від межі міцності при швидких завантаженнях  $\sigma_p$ , складаються в деяку криву  $0A_1A_2A_3A_4A_5$ , причому точка  $A_5$  є межею міцності випробуваного ґрунту ( $A_p$ ), а крива є ізохронною кривою при  $t=0$ , тобто кривою миттєвої деформації, яку можна отримати із лабораторних досліджень. З цього слідує висновок, що можна визначати області первинної (миттєвої) деформації шляхом знаходження первинної лінійної ділянки ізохронної кривої при  $t=0$  (рис. 4), а тангенс кута нахилу цієї ділянки буде дорівнювати модулю пружності  $t g \alpha = E$  (див. рис. 3).

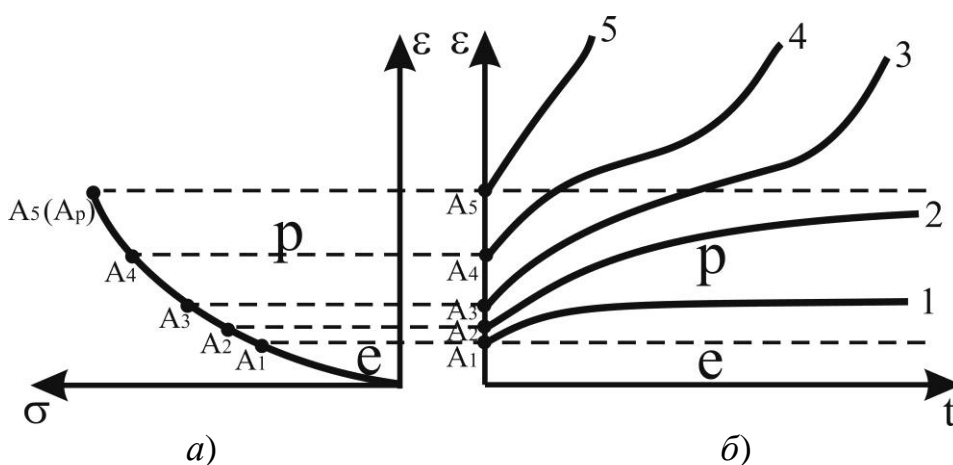


Рис. 4. Практичне розділення компонент деформацій:  
 $a$  – ізохронна крива при  $t=0$ ;  $b$  – сімейство кривих повзучості 1–5

Таким чином, побудувавши два графіки деформації (миттєвий – ізохронна крива при  $t = 0$  або при швидкому завантаженні, тривалий – сімейство кривих повзучості) можна повністю розділити деформації на практиці і в подальшому застосовувати в ході математичного моделювання (рис. 4). Пунктирні лінії відсікають області миттєвої пружної  $\varepsilon_e$  і миттєвої пластичної  $\varepsilon_p$  компонент загальної деформації, але не вказують на характер деформації в часі, який є тільки в'язким.

Для теоретичних побудов дослідження НДС в'язко-пружно-пластичного середовища, окрім принципу накладення деформацій слід прийняти принцип моделювання процесів, які відбуваються при деформуванні повзучості. Під цим принципом розуміється те, що процес, який відбувається в дійсності (*real*), наприклад, процес в'язкої або в'язко-пластичної деформації масиву, можна змодельовувати за допомогою експериментальних лабораторних даних, а математична або імітаційна модель системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» є спробою якнайповнішого відображення цієї поведінки.

Для відображення деформування в процесі повзучості на основі отриманих лабораторних результатів застосований принцип циклу перевірки, який реалізовано для використання в імітаційному моделюванні з комп'ютерного програмування. Цикл перевірки виглядає як процес логічного виразу: IF (умова 1) THEN (умова 2) ELSE (умова 3). Наданий цикл застосовано для відбору із побудованих на основі експериментів сімейств повзучості відповідних конкретному рівню напружень кривих деформування. Первинною інформацією є результати лабораторних досліджень (дані для імітації процесу деформування) і поля напружень, які отримані в процесі чисельних розрахунків. На основі циклів перевірки можливо визначити реологічні рівняння для отриманих лабораторних сімейств повзучості та релаксації, оскільки проведений аналіз зміщень закріпленої виробки свідчить про неоднорідність реологічних явищ навколо виробки кругового обрису – наявності одночасно на різних частинах контуру як повзучості, так і релаксації.

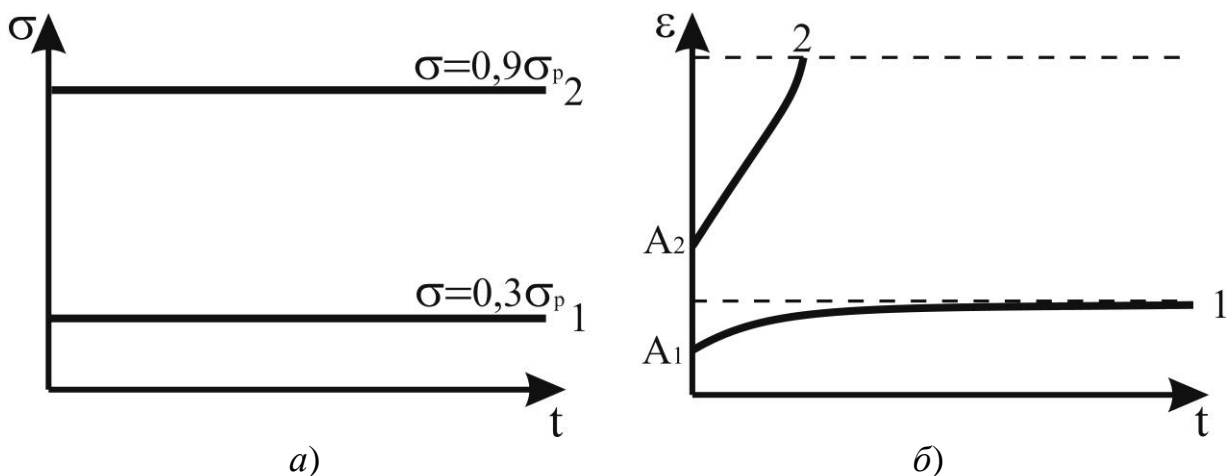


Рис. 5. Графік для проведення циклу перевірки:  
 а – характер навантаження; б – розвиток деформацій

Наприклад, для двох кривих повзучості (див. рис. 5), цикл виглядатиме таким чином:

$$IF \sigma \leq 0,3\sigma_p THEN \left( \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left( 1 - e^{\frac{-E_2 t}{\eta}} \right) \right) ELSE (0)$$

...

$$IF \sigma \geq 0,9\sigma_p THEN \left( \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_T)t}{\eta} \right) ELSE (0)$$
(2)

тобто в першому циклі  $\sigma_1 = 0,3\sigma_p$  надається рівняння моделі Ішлинського, в другому циклі  $\sigma_2 = 0,9\sigma_p$  – рівняння моделі Бінгама.

Отримані аналітичні побудови дозволяють більш повно розглянути утворення реологічних явищ при взаємодії в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив», внести корективи в рівняння взаємодії системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» і надають можливість наблизитися до більш адекватної моделі поведінки ґрунтового масиву та тунельної конструкції.

Із урахуванням отриманих результатів в розділі наведені аналітичні побудови, які в подальшому були застосовані при розробці адекватної реальним умовам моделі. Побудова моделі системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» при математичному моделюванні МСЕ згідно теоретичним положенням суцільного середовища є заставою адекватності даних, одержаних в результаті розрахунку, і параметрів, властивих реальній системі. Виходячи з цього, глибокий аналіз побудови моделі і виявлення особливостей, які дозволяють добитися максимальної адекватності, є першорядними задачами при знаходженні НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив». Виконане рішення такої задачі полягає в теоретичному обґрунтуванні запропонованої моделі, виявленні особливостей її побудови і представленні практичних рекомендацій з урахування для найбільшої адекватності аналітичних результатів параметрам, діючим в натурних умовах.

У **третьому розділі** викладені теоретичні основи енергетичного підходу до аналізу НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив». Під енергетичним підходом в наданій роботі розуміється сукупність прийомів оперування енергією системи, зокрема енергією деформації, як найважливішим її параметром. Під прийомами оперування енергією системи слід розуміти набір операцій над енергією, таких як її чисельне визначення, порівняння з деякими критеріями, перерозподіл в процесі зміни параметрів системи і так далі.

У енергетичному підході деформація ґрунтів (порід), елементів конструкції і сумісна деформація в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив» розглядається як зміна об'єму і форми під дією зовнішніх сил (без урахування впливу теплових процесів). Зміна об'єму і форми (об'ємна деформація і деформація формозміни) є узагальненими координатами, зовнішні сили (тензор напружень) – узагальненими потенціалами. Відповідно фундаментальне рівняння енергії в загальному випадку деформації (рівняння Гіббса) записується в наступ-

пному вигляді:

$$dU = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

де  $dU$  – питома внутрішня енергія (віднесена до одиниці об'єму);  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{ij}$  – тензори напружень і деформацій відповідно.

На відміну від термодинамічного, в енергетичному підході система бере участь в ізотермічному процесі деформації, тобто зміна вільної енергії тотожно дорівнює роботі, яка виконується в процесі деформації ( $A = -\Delta F$ ), тому можна записати роботу як

$$A = -\Delta F = - \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}. \quad (4)$$

Розділяючи роботу за деформаціями об'єму  $A_{\hat{\gamma}}$  і форми  $A_{\hat{\delta}}$  формулюємо два рівняння

$$A_{\hat{\gamma}} = - \int_0^{\varepsilon_{\hat{\gamma}}} \sigma_{\hat{\gamma}} d\varepsilon_{\hat{\gamma}} = -\Delta F_{\hat{\gamma}}; \quad (5)$$

$$A_{\hat{\delta}} = - \int_0^{\gamma_{\hat{\delta}}} \tau_{\hat{\delta}} d\gamma_{\hat{\delta}} = -\Delta F_{\hat{\delta}}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{\hat{\gamma}}$  – середнє нормальне напруження;  $\varepsilon_{\hat{\gamma}}$  – середня нормальна деформація;  $\tau_{\hat{\delta}}$  – середнє дотичне напруження;  $\gamma_{\hat{\delta}}$  – середня дотична деформація.

Питома енергія деформації тунельної конструкції і взаємодіючого з нею оточуючого масиву є інтегральною характеристикою міцності, і знаходиться в прямій залежності від рівня напружень і деформацій і в зворотній залежності від об'єму частин системи, що деформуються.

Дещо складніше виглядають залежності для питомої енергії і роботи у разі пружно-пластичного деформування. Відомо, що при пружно-пластичній деформації  $\delta\varepsilon_{ij} = \delta\varepsilon_{ij}^e + \delta\varepsilon_{ij}^p$ , де  $\delta\varepsilon_{ij}^e$  і  $\delta\varepsilon_{ij}^p$  – відповідно зворотна (пружна) і незворотна (пластична) компоненти загальної деформації відповідно, а залежність для роботи записується:

$$\delta A = \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \sum \sigma_{ij} (\delta\varepsilon_{ij}^e + \delta\varepsilon_{ij}^p). \quad (7)$$

У разі незворотних рівноважних процесів, тобто не залежних від часу, до яких відноситься випадок пластичної деформації, частина питомої енергії дисипує, трансформуючись в тепло, тобто  $dU = A + Q$ , де  $Q$  – енергія дисипації (розсіяння).

Остаточно рівняння для енергії дисипації записується в наступному вигляді-

ді:

$$\delta Q = dU - \delta A = \left( \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}^e} - \sigma_{ij} \right) \delta \varepsilon_{ij}^e + \left( \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}^p} - \sigma_{ij} \right) \delta \varepsilon_{ij}^p + \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right) \delta T. \quad (8)$$

Стисло основне положення енергетичного підходу формулюється у вигляді

$$U_{\dot{A}\ddot{N}} \leq [U], \quad (9)$$

де  $U_{\dot{A}\ddot{N}}$  – енергія, знайдена з розрахунку НДС системи;  $[U]$  – розрахункова енергія матеріалу, при перевищенні значення якої відбувається його руйнування.

Окрім теоретичних побудов для енергії пружно-пластичної деформації, вперше одержані залежності для реологічних явищ, наприклад, повзучості. Запишемо загальну енергію деформації  $\dot{Y}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}$ , дотримуючись принципу накладення деформацій:

$$\dot{Y}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \dot{Y}_e + \dot{Y}_p + \dot{Y}_v = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma_e \varepsilon_e d\varepsilon_e + \int_{\varepsilon_e}^{\varepsilon_p} \sigma_p \varepsilon_p d\varepsilon_p + \int_0^{\varepsilon_v} \sigma_v \varepsilon_v d\varepsilon_v. \quad (10)$$

Розглядаючи процес повзучості або релаксації найпростіше одержати кінцеву енергію руйнування, математично рівну множенню постійного напруження на деформацію у момент руйнування:

$$\dot{Y}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \sigma \varepsilon_v. \quad (11)$$

Відповідно геометричним значенням даного виразу є добуток ординати  $\varepsilon_{e+p+v} - \varepsilon_{e+p}$  на постійне напруження  $\sigma = const$  (для умови повзучості, рис. 6).

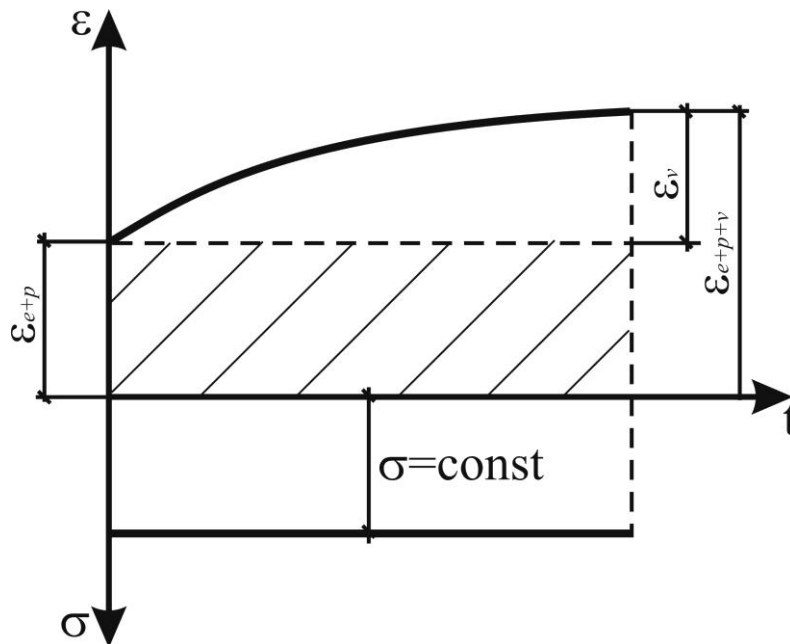


Рис. 6. Геометричне значення енергії деформування у випадку повзучості



Для сімейства кривих повзучості обчислюють енергію  $\mathcal{E}_{e+p}$  після побудови ізохронної кривої при  $t = 0$  (рис. 7).

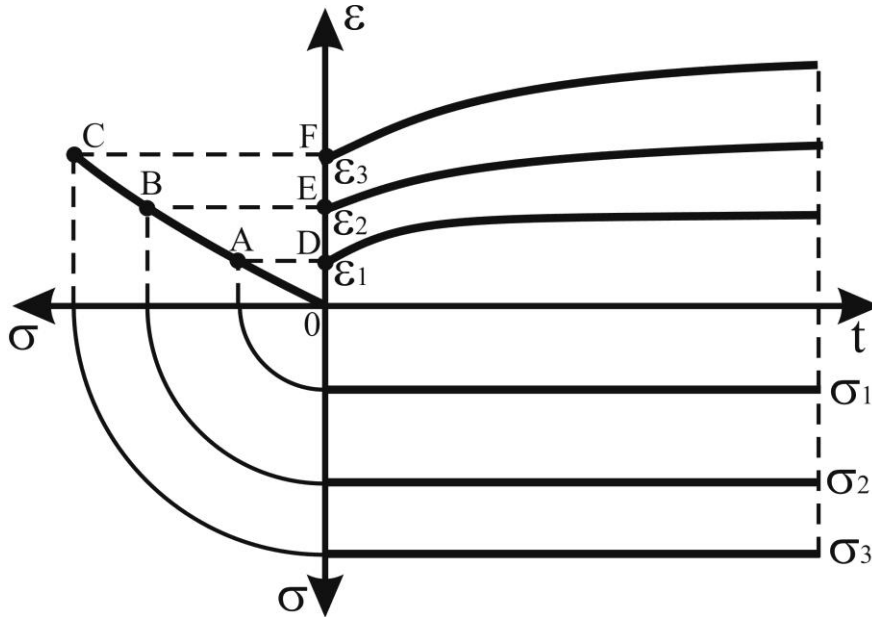


Рис. 7. Схема визначення енергії  $\mathcal{E}_{e+p}$  за ізохронною кривою при  $t = 0$

Відповідно площа фігури  $OAD$  дорівнює енергії умовно-миттєвої деформації кривої 1, тобто  $\sigma_1 \varepsilon_1$ , фігура  $OBE$  – енергії  $\sigma_2 \varepsilon_2$ , фігура  $OCF$  – енергії  $\sigma_3 \varepsilon_3$ , причому розділення виду деформації (пружна або пластична) проводиться за запропонованою вище методикою.

Таким чином, енергія в'язкої деформації є добуток ординати  $\varepsilon_v$  на постійне напруження (рис. 6) і записується як різниця енергій за формулою (10).

В подальшому основи теоретичного підходу були застосовані для дослідження імпульсної дії. Умова енергетичного підходу в даному випадку записується таким чином:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y} &> \dot{Y}_D, \text{êïñòðóêö³ ÿ ðóéíó°òüñÿ} \\ \dot{Y} &= \dot{Y}_D, \text{êïñòðóêö³ ÿ â ãðàíê÷íî ñðàí³} \\ \dot{Y} &< \dot{Y}_D, \text{êïñòðóêö³ ÿ íà ðóéíó°òüñÿ} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де  $\dot{Y}_D$  – енергія руйнування конструкції.

Для більш глибокого аналізу НДС пропонується для дослідження міцності конструкцій застосувати концепцію статусності НДС для комплексного дослідження системи або її частин, для визначення якого введемо в аналіз НДС поняття «статус» ( $St$ ). Під статусом розумітимемо зміну НДС внаслідок зміни параметрів системи в  $n$  раз, причому початковим статусом ( $St=1$ ) називатимемо статус НДС системи в стаціонарному стані (наприклад, в стані рівноваги). Практично статус НДС системи визначається з порівняння напруженого і дефо-

рмованого станів початкової системи і тієї ж системи зі зміненими параметрами:

$$St(\sigma) = \frac{\sigma_k}{\sigma_n}, \quad (13)$$

$$St(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} \quad (14)$$

де  $St(\sigma)$  і  $St(\varepsilon)$  – відповідно статуси напруженого і деформованого станів;  $\sigma_k$  і  $\varepsilon_k$  – відповідно напруження і переміщення системи із зміненими параметрами;  $\sigma_n$  і  $\varepsilon_n$  – відповідно напруження і переміщення початкової системи.

Оскільки статус є кількісною характеристикою тільки НДС і не дає можливості аналізувати або класифікувати причини, що викликають його зміну, в комплексний аналіз НДС тунельних конструкцій введений термін «вага» ( $Wt$ ), який якісно описуватиме зміни в системі. Практично був виконаний статусний аналіз колонної станції мілкового закладення, а як системи-варіації розроблені моделі початкової станції із зміненими геометричними параметрами.

Як найбільш комплексна оцінка НДС запропоноване повніше використання первинної інформації (результатів розрахунку на ПЕОМ), яке реалізується в застосуванні підпрограм, дією яких є обробка даних розрахункового комплексу, метою якого є отримання ґрунтовнішої інформації, ніж первинна інформація розрахункового комплексу.

Проведене практичне застосування енергетичного підходу і прийому критеріального аналізу (фільтрування) для комплексного аналізу НДС колонної станції глибокого закладення. Для кількісного аналізу напруженого стану застосована енергетична теорія міцності (четверта):

$$\sigma_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}}^{IV} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma] \quad (15)$$

де  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$  – компоненти нормальних напружень за глобальними осями X і Z;  $\tau_{xz}$  – дотична компонента в площині XZ;  $[\sigma]$  – межа міцності матеріалу, в ролі якого виступає розрахунковий опір стиску бетону  $R_b$  ( $R_b = [\sigma] = 17$  МПа для бетону класу В30, що найчастіше застосовується в будівництві підземних споруд). При аналізі компонент напружень по осях з'ясувалося, що значення компоненти у (напруження, діючі вздовж моделі) часто на порядок менше горизонтальної x і вертикальної z і тому їх урахування при розрахунку еквівалентних напружень змінює їх значення неістотно. Тому і надалі, у формулі (15) компонента у була опущена.

Для подальшого процесу критеріального аналізу, окрім компонент напружень по осях визначаються головні напруження, а для аналізу енергії системи визначається питома енергія в елементах моделі (рис. 8).

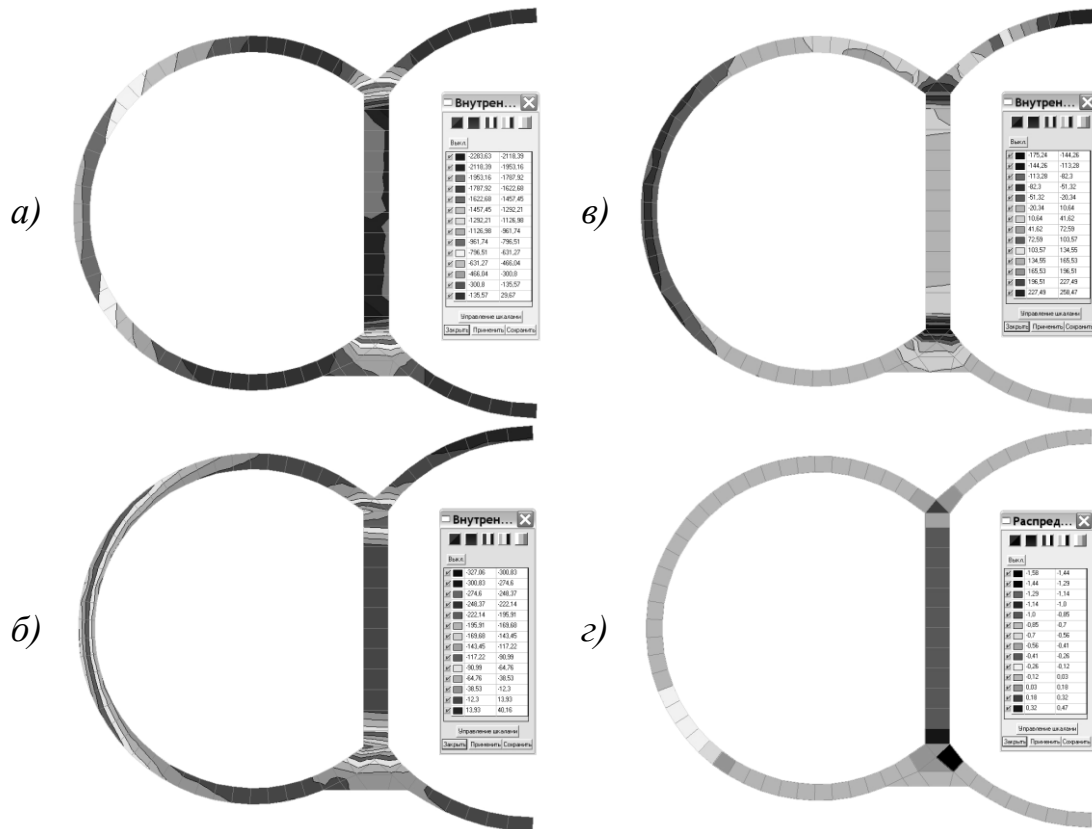


Рис. 8. Ізолінії та ізополя напруженого стану: *a* – головні напруження  $\sigma_1$ ; *б* – головні напруження  $\sigma_2$ ; *в* – головні напруження  $\sigma_3$ ; *з* – значення питомої енергії в Дж

Додатковою часткою критеріального аналізу є визначення виду деформації за допомогою показника Надаї – Лоде (рис. 9), який дозволяє отримати більш детальну картину деформування.

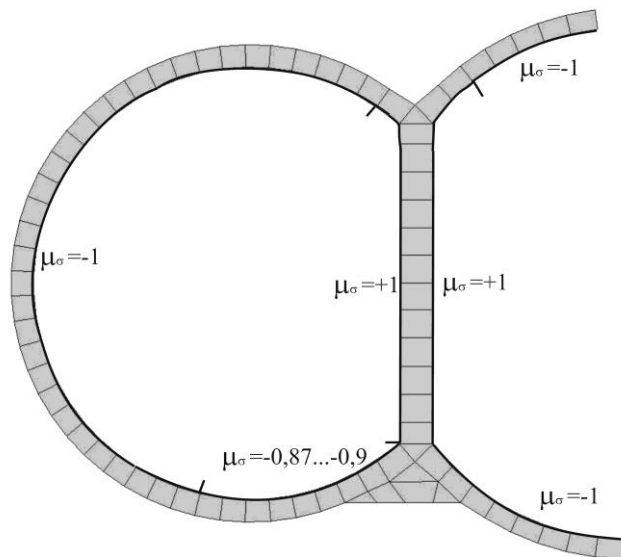


Рис. 9. Значення показника Надаї-Лоде на внутрішній поверхні оправи станції

Відповідно до значень показника Надаї-Лоде визначається характерна поведінка елементів конструкції:  $1 \geq \mu_\sigma \geq 0,5$  – стиск;  $0,5 \geq \mu_\sigma \geq 0$  – стиск із зрушенням;  $\mu_\sigma = 0$  – зрушення;  $0 \geq \mu_\sigma \geq -0,5$  – розтяг із зрушенням;  $-0,5 \geq \mu_\sigma \geq -1$  – розтяг. Аналіз рис. 9 свідчить, що практично, окрім колони, вся внутрішня поверхня елементів станційної конструкції знаходиться в розтягнутому стані, також спостерігається зона із значенням показника Надаї-Лоде менше одиниці (зона в нижній частині бічного тунелю і в основі колони), в якій можлива деформація у вигляді розтягування із зрушенням при досягненні показником значення  $-0,5$ .

З аналізу проведених процедур критеріального аналізу і одержаних результатів встановлено, що дана конкретна станційна конструкція колонного типу при взаємодії з оточуючим масивом повністю відповідає умовам міцності і надалі готова до нормальної експлуатації в підземних умовах.

**Четвертий розділ** присвячено натурним дослідженням деформування тунельних конструкцій, результати яких застосовано при оцінці адекватності розроблених в дисертаційній роботі основ комплексного аналізу. Для цього були проведені натурні експерименти у вигляді інструментальних вимірювань деформацій оправи лівого перегінного тунелю між станціями «Либідська»–«Диміївська» Київського метрополітену. Основними результатами цих вимірювань були наступні параметри: 1) відхилення склепіння в укладанні; 2) відхилення склепіння за комплексом; 3) еліптичність вертикального діаметру в укладанні (монтажна еліптичність); 4) еліптичність вертикального діаметру за комплексом; 5) еліптичність горизонтального діаметру за комплексом; 6) відхилення лотка за комплексом.

Ці параметри характеризують деформований стан оправи перегінного тунелю в період будівництва (в укладанні, тобто в процесі монтажу оправи) і в період експлуатації (за комплексом, тобто в період стабілізації деформацій). На рис. 10-11 наведені графіки результатів інструментальних натурних досліджень переміщень характерних точок кілець оправи за щитовим комплексом.



Рис. 10. Результати інструментальних досліджень переміщень точок оправи (склепіння) за комплексом



Рис. 11. Результати інструментальних досліджень еліптичностей за комплексом

Для аналізу складного деформування оправи в процесі укладання також був проаналізований розподіл еліптичностей.

При постановці кільця в проектне положення із завищенням  $\Delta_{\delta}$  і переміщенні центру оправи вгору, вертикальна еліптичність  $\dot{Y}_{\dot{a}\dot{a}\dot{\delta}}$ , зменшуючи вертикальний діаметр, переміщує центр оправи вниз на значення половини вертикальної еліптичності. Таким чином, положення центру оправи слід визначати наступним шляхом: з різниці між відхиленнями склепіння за фактом  $\Delta_{\delta}$  і за комплексом  $\Delta_{\epsilon}$  слід відняти половину вертикальної еліптичності  $\dot{Y}_{\dot{a}\dot{a}\dot{\delta}}/2$  (рис. 12).

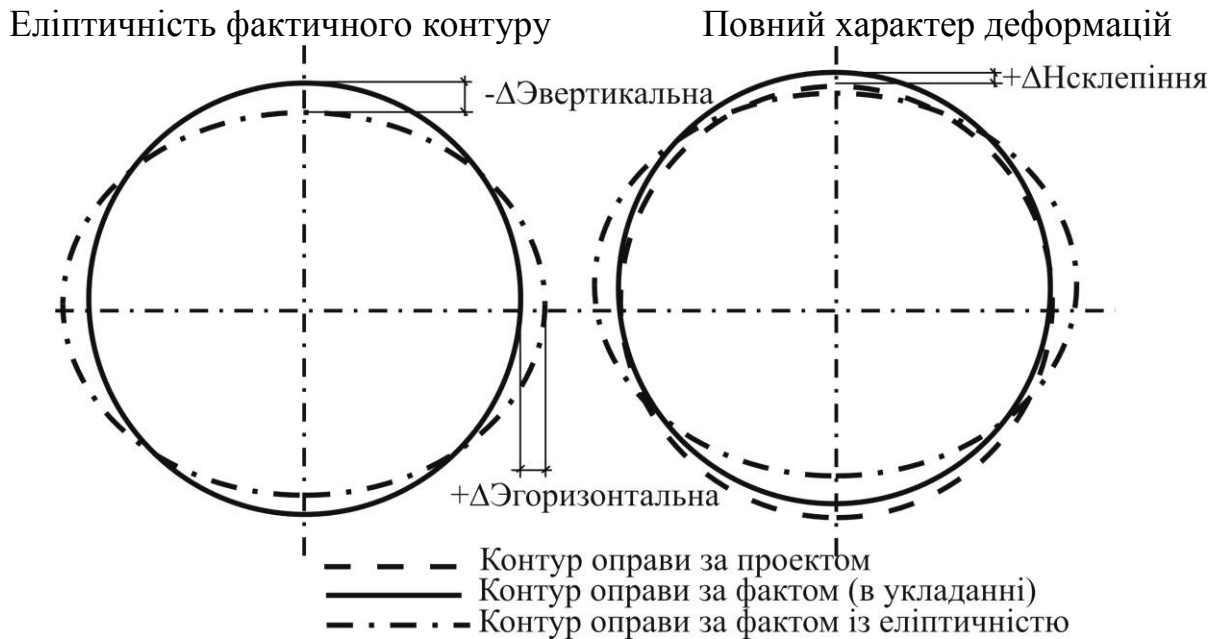


Рис. 12. Характер деформації кільця після стабілізації

Для порівняльного аналізу до розрахунку розроблені дві скінченно-елементні моделі, які відповідають кільцям лівого перегінного тунелю між станціями «Либідська»–«Диміївська». До розрахунку прийняті наступні кільця

оправи – № 105 і № 205 (рис. 13).

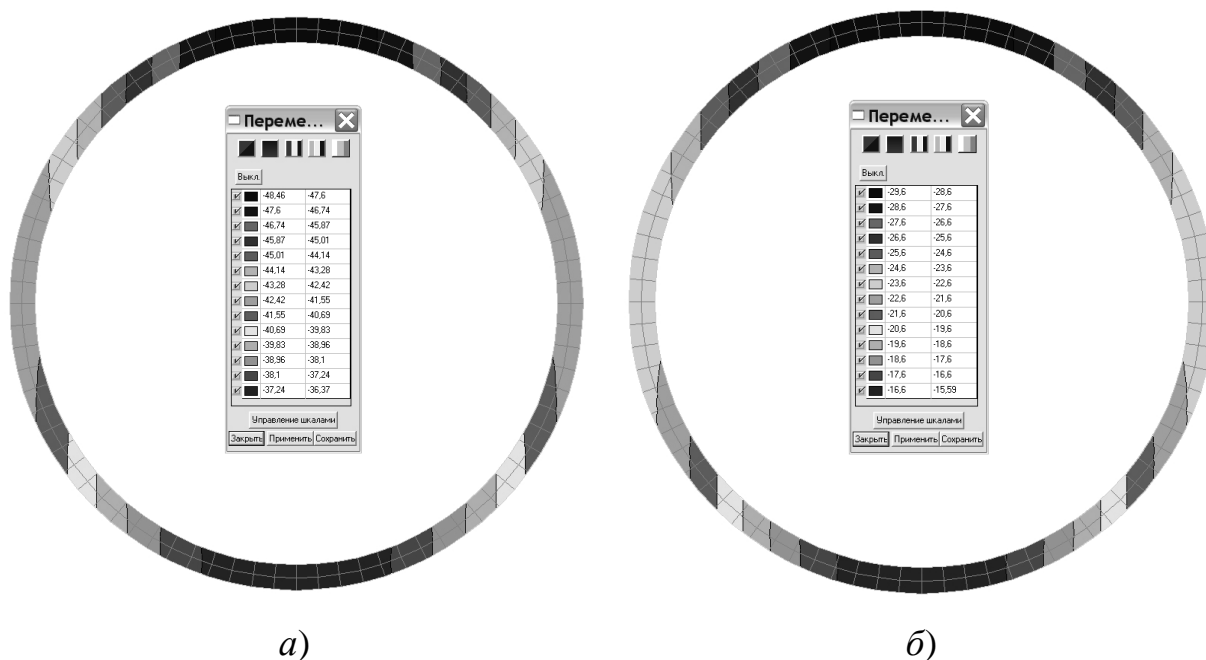


Рис. 13. Вертикальні деформації фрагмента СЕ-моделі (оправа перегінного тунелю): а – кільце №105; б – кільце №305

Аналіз результатів математичного моделювання кілець лівого перегінного тунелю між станціями «Либідська»–«Диміївська» дає можливість встановити, що застосовані при побудові скінченно-елементної моделі наданої тунельної конструкції теоретичні положення, пов'язані з концепцією комплексного аналізу, дозволяють найточніше врахувати взаємодію конструкції з оточуючим масивом і одержати адекватні дійсності детальні параметри деформованого стану. Відносна похибка між результатами інструментальних досліджень і результатами математичного моделювання складає: для кільця № 105 – 20 %, для кільця № 205 – 17,6 %.

Для більш повного доказу достовірності проведені дослідження загальних закономірностей поведінки оправ ескалаторних тунелів при їх взаємодії з шаруватим оточуючим масивом, для чого виконаний аналіз результатів інструментальних вимірювань деформацій, що проводилися впродовж деякого часу. Після проведених натурних досліджень одержані картини розвитку деформацій в певні терміни по наступних об'єктах: 1) ескалаторний тунель із збірною залізобетонною оправою станції «Сирець»; 2) ескалаторний тунель із збірною залізобетонною оправою станції «Дорогожичи»; 3) ескалаторний тунель із збірною чавунною оправою станції «Лук'янівська»; 4) ескалаторний тунель із збірною чавунною оправою станції «Дружба народів».

Для оцінки достовірності розроблених в дисертації положень також був проведений порівняльний аналіз теоретичних побудов розрахунку НДС тунельних конструкцій і розробленої автором практичної методики, для чого була розроблена модель ескалаторного тунелю, в якій враховано вплив натяжної камери та наземного вестибюлю, а також складні інженерно-геологічні умови

(шаруватий масив). Результати, які отримані після її розрахунку порівнювалися із переміщеннями, отриманими при інструментальних дослідженнях.

Відносна похибка між результатами інструментальних вимірювань і розрахунку МСЕ склала 11...15 %, що свідчить про адекватність розробленої СЕ-моделі реальній споруді.

В **п'ятому розділі** розроблені основи комплексного аналізу тунельних конструкцій. Визначено три аспекти, врахування яких забезпечує отримання найдетальнішої і адекватнішої реальної тунельної конструкції картини поведінки моделі, тобто дійсна конструкція була досліджена віртуально. Ці три аспекти такі: 1) відображення реальної взаємодії між елементами загальної системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» і їх властивостей в скінченно-елементній моделі; 2) детальний аналіз одержаних результатів; 3) урахування можливих станів системи і їх моделювання. Таким чином, урахування даних аспектів проблеми є ядром концепції комплексного аналізу тунельних конструкцій.

Як приклад такого аналізу для отримання найбільш репрезентативних і детальних результатів проведений комплексний аналіз конструкції колонної станції метрополітену, причому запропонована конструкція є типовою для умов будівництва станцій метрополітену мілкового закладення в м. Києві. У комплексний аналіз даного об'єкту входять: 1) статичний і модальний аналіз; 2) аналіз колонної станції мілкового закладення на рухоме навантаження; 3) дослідження НДС станційної конструкції у разі ударного навантаження; 4) динамічний аналіз конструкції станції у разі імпульсної дії.

Після отримання НДС конструкції станції в статичній постановці, вперше проведений також і модальний аналіз такої конструкції, результати якого (форми і частоти власних коливань) є початковими параметрами для імпульсного аналізу.

Після статичного і модального аналізу скінченно-елементної моделі колонної станції проведено її розрахунок на дію рухомого навантаження статичного характеру (навантаження НК-80), яке прикладається на рівній відстані між колонами та проведено дослідження впливу глибини закладення на зростання еквівалентних напружень в самому навантаженому елементі станційної конструкції (рис. 14).

Проведене дослідження НДС колонної станції мілкового закладення при дії ударних навантажень, метою якого є дослідження наслідків авіакатастрофи для станції метрополітену мілкового закладення. З'ясовано, що закономірність розвитку еквівалентних напружень від імпульсу відповідає лінійному закону (рис. 15).

Як важлива частина комплексного аналізу, проведено дослідження імпульсних дій (вибухові навантаження), оскільки їх вплив на НДС тунельних конструкцій мало вивчений, а поява в підземних умовах відмічена визначеною ймовірністю. Для подальшого аналізу станції колонного типу розраховані основні параметри імпульсу на відстані 0,5 м від динамічного джерела: імпульс (приведений до одиничної площі)  $I=0,8$  кН·с, час дії імпульсу  $t=0,00106$  с, форма імпульсу – трикутна. Місце прикладення імпульсу в моделі – 1 м від рівня чистої

підлоги платформи.

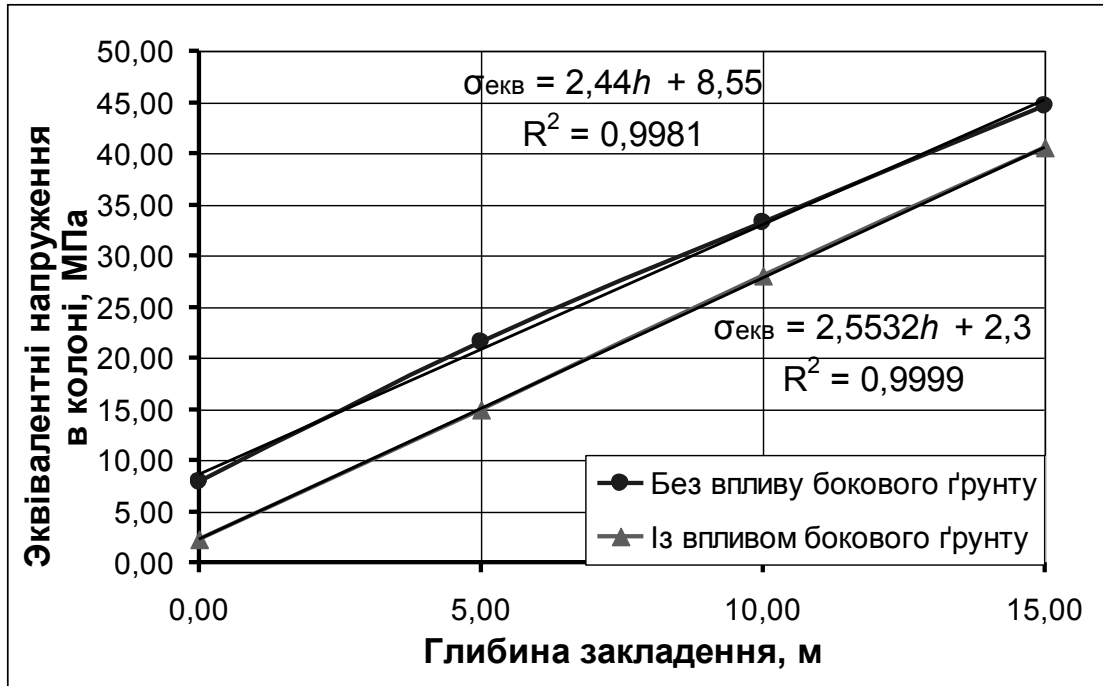


Рис. 14. Графіки залежності еквівалентних напружень від глибини закладення

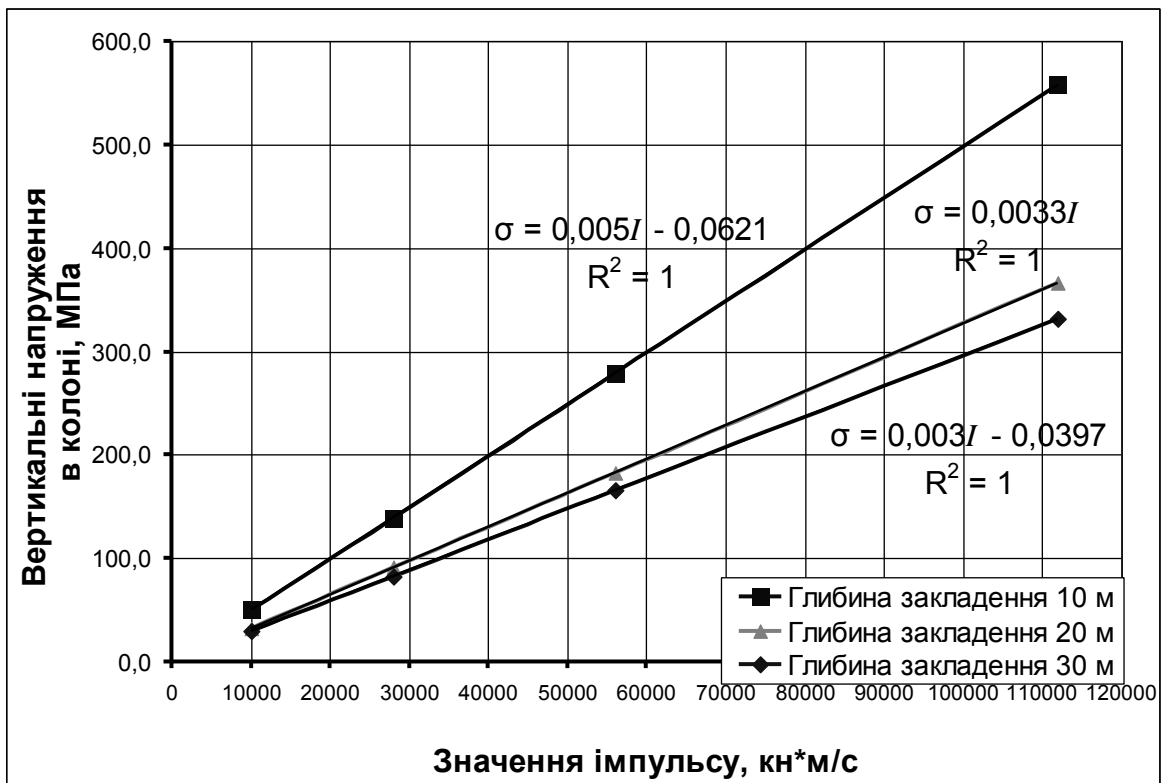


Рис. 15. Графіки залежності еквівалентних напружень від величини імпульсу

Скориставшись формулою енергетичної теорії міцності, і розрахувавши еквівалентні напруження (рис. 16) в місці прикладення імпульсу, можна встановити, що воно дещо перевищує і межу міцності арматури. Таким чином, мо-



жна стверджувати, що колона буде зруйнована і це призведе до аварійної ситуації.

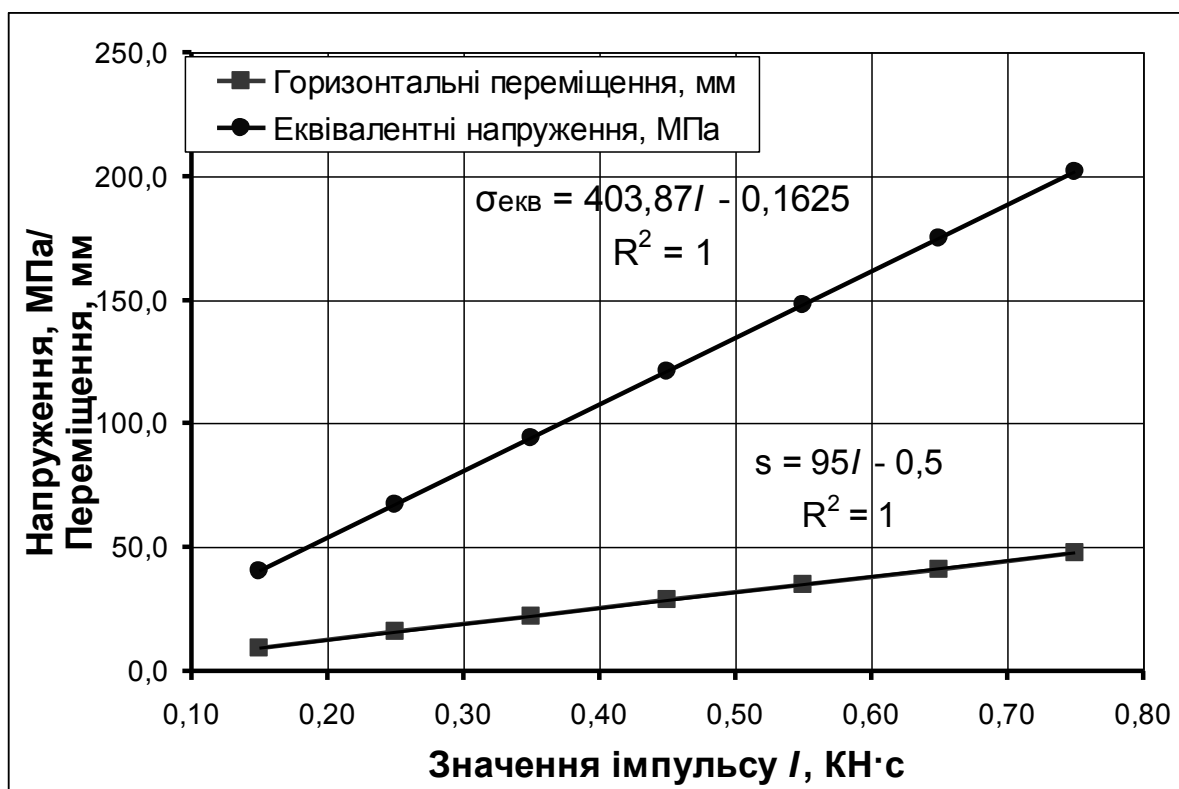


Рис. 16. Графік напружень та переміщень від дії імпульсу

Як важливу частину комплексного аналізу проведене дослідження конструкцій станцій метрополітену у разі прогресуючого руйнування. Для станцій метрополітену мілкого і глибокого закладення аналіз випадку прогресуючого руйнування проводиться вперше, тому отримання інформації в ході його прояву є актуальним, оскільки дає можливість отримання репрезентативних даних про складне явище і подальшого впливу на його характер.

Для дослідження можливого прогресуючого руйнування створені три моделі, в яких передбачено розвиток прогресуючого руйнування внаслідок поетапного руйнування колон. Близькі значення коефіцієнтів запасу II і III етапів дають можливість зробити висновок про те, що процес прогресуючого руйнування, впливаючи на сусідні ряди колон, згідно «ефекту доміно» втягує в активну деформацію нові елементи, таким чином збільшуючи зону руйнування.

Також вперше проведене дослідження у разі прогресуючого руйнування для колонної станції метрополітену глибокого закладення. Модель трьохсклепінчастої колонної станції побудована на основі реальних геометричних розмірів з використанням об'ємних скінченних елементів.

Висновки, які можна зробити в результаті аналізу, наступні: для конкретних інженерно-геологічних умов закладення станції колонного типу дослідження на прогресуюче руйнування зайве, оскільки введення локальних деформацій в найбільш навантажений і маючий нагоду втрати стійкості елемент конструкції (колона) привело лише до локальної зміни напруженого стану,

причому для конкретних умов значення напружень знаходяться в межах міцності матеріалу; зміна напружень у разі повного руйнування однієї колони свідчить, що вони знаходяться в допустимих межах і, таким чином, крок колон для конкретної конструкції можна збільшити до 6...8 м без втрати міцності матеріалу, про що свідчать графіки зростання еквівалентних напружень (рис. 17).

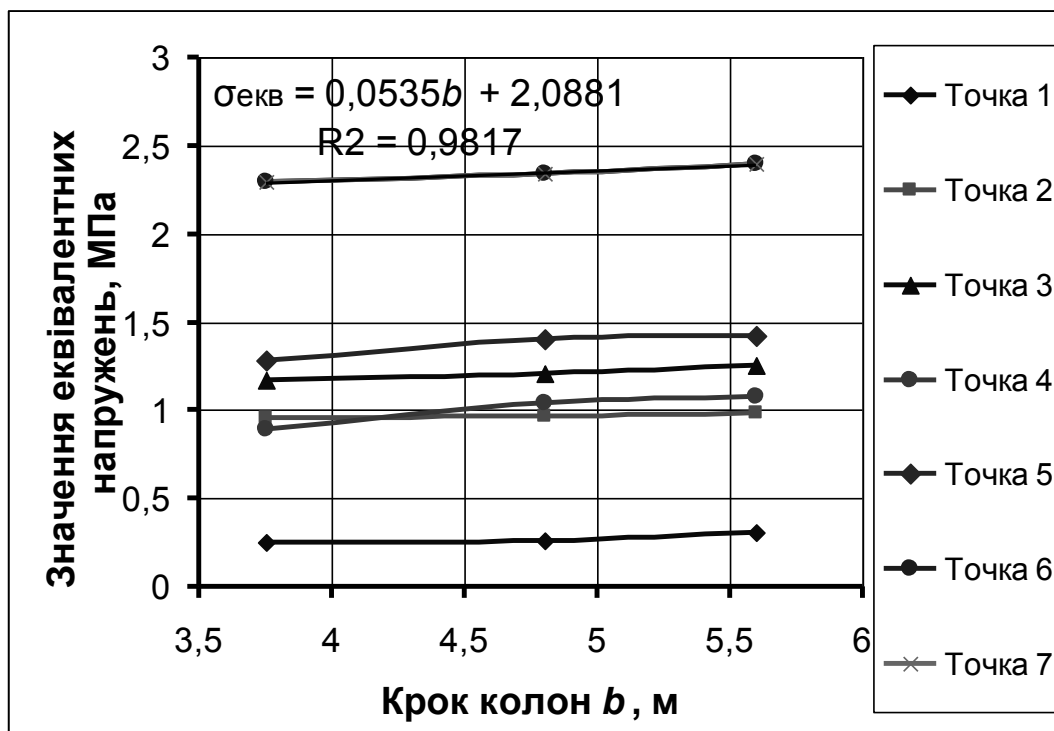


Рис. 17. Графіки залежності еквівалентних напружень від кроку колон

Аналітична залежність еквівалентних напружень в точках концентрації від кроку колон має вигляд рівняння прямої лінії –  $\sigma_{екв} = 0,0535b + 2,0881$  (рис. 17), а достовірність апроксимації  $R^2 = 0,98$ , тобто одержана залежність має функціональний вигляд. Користуючись цим виразом, набудемо значення критичного кроку колон  $b_{кр}$ . Для інженерно-геологічних умов, в яких була закладена станція колонного типу можна було б застосувати крок колон значно більший, наприклад,  $b = 6...8$  м, причому максимальні еквівалентні напруження коливалися б близько 3 МПа.

Вперше проведений аналіз власних форм і частот пілонної станції на основі просторової моделі з урахуванням і без урахування приєднаних мас ґрунту. Слід зазначити, що результати проведеного модального аналізу є порівняльними параметрами при виконанні динамічних розрахунків на сейсмічні, імпульсні і періодичні дії, і тому проведення таких досліджень актуальне для розвитку концепції комплексного аналізу тунельних конструкцій.

Проведений динамічний аналіз станції пілонного типу глибокого закладення на імпульсні дії (вибухові) надав можливість визначити зону руйнування пілона, яка має вид еліпсоїда обертання із значеннями довжин осей: по вертикальній осі – 1,6...1,7 м; по поздовжній – близько 3 м; по горизонтальній – 1,25 м (половина ширини пілона з примиканням оправи бічного і середнього тунелю).

лів). Одержані результати свідчать, що руйнування бетону пілона охоплює значну зону і може привести до негативних наслідків.

У роботі виконане математичне моделювання впливу метропроїзду на конструкцію пілонної станції метрополітену (у статичній і динамічній постановці). Надане дослідження проводиться для того, щоб з'ясувати вплив рухомого складу на загальний стан конструкції пілонної станції і її елементів (цей розрахунок нормується Державними будівельними нормами «Метрополітени» як обов'язковий). Аналіз випадків додатку навантажень на різні шпали в моделі станції свідчить, що вплив рухомого складу є локальним і на опрау в лотковій частині впливає неістотно. Значний вплив метропроїзду відбувається на рівні 0,5...0,8 м в бетоні лоткової частини, але значення напружень можна вважати незначними в порівнянні з міцністю бетону В12,5 (0,24...0,26 МПа – горизонтальні напруження, максимум – 0,29 МПа у разі одночасного впливу на 2 і 8 шпалу; 0,70...0,71 МПа – вертикальні напруження у всіх випадках; напруження рівня 0,05...0,06 МПа – дотичні в площині XZ, подовжні напруження дуже малі і практично не впливають на загальну картину НДС). Запас міцності бетону лоткової частини від дії тільки рухомого складу складає десятки разів.

Розрахунок конструкції станції на дію рухомого складу в статичній постановці можна вважати перевірочним, оскільки він не надає результатів, які могли б дати можливість висновку про їх більшу значущість. Цей висновок підтверджується часткою напружень від рухомого складу від загального напруженого стану – вона складає приблизно 1...2 %. Дослідження впливу метропроїзду в статичній і динамічній постановках дозволило зробити висновок, що для станції пілонного типу такі розрахунки можуть вважатися перевірочними.

На основі принципів комплексного аналізу проведено порівняння двох принципово різних конструкцій односклепінчастої станції, яке дозволяє в процесі проектування більш обґрунтовано ухвалювати рішення з вибору тунельних конструкцій, оскільки техніко-економічне порівняння було не на користь варіанту з більш кращими характеристиками взаємодії з оточуючим масивом.

**Шостий розділ** присвячений чисельному аналізу технологічних процесів як складовій комплексного аналізу. Важливу роль у формуванні НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» відіграють технологічні процеси проходки виробки, монтажу оправи і первинного нагнітання.

Для дослідження НДС в системі «тунельна конструкція – оточуючий масив» в процесі проходки змодельована наявність щита і щитового комплексу, причому дія гідроциліндрів значно змінює картину напружень. Доведено, що при кріпленні лоба забою виконуючим органом значення напружень в бетоні оправи майже на порядок менше значення межі міцності на стиснення.

Застосування чисельного аналізу технології спорудження станції метрополітену дозволив встановити її вплив на формування НДС. Змодельовані чотири етапи спорудження станції (рис. 18).

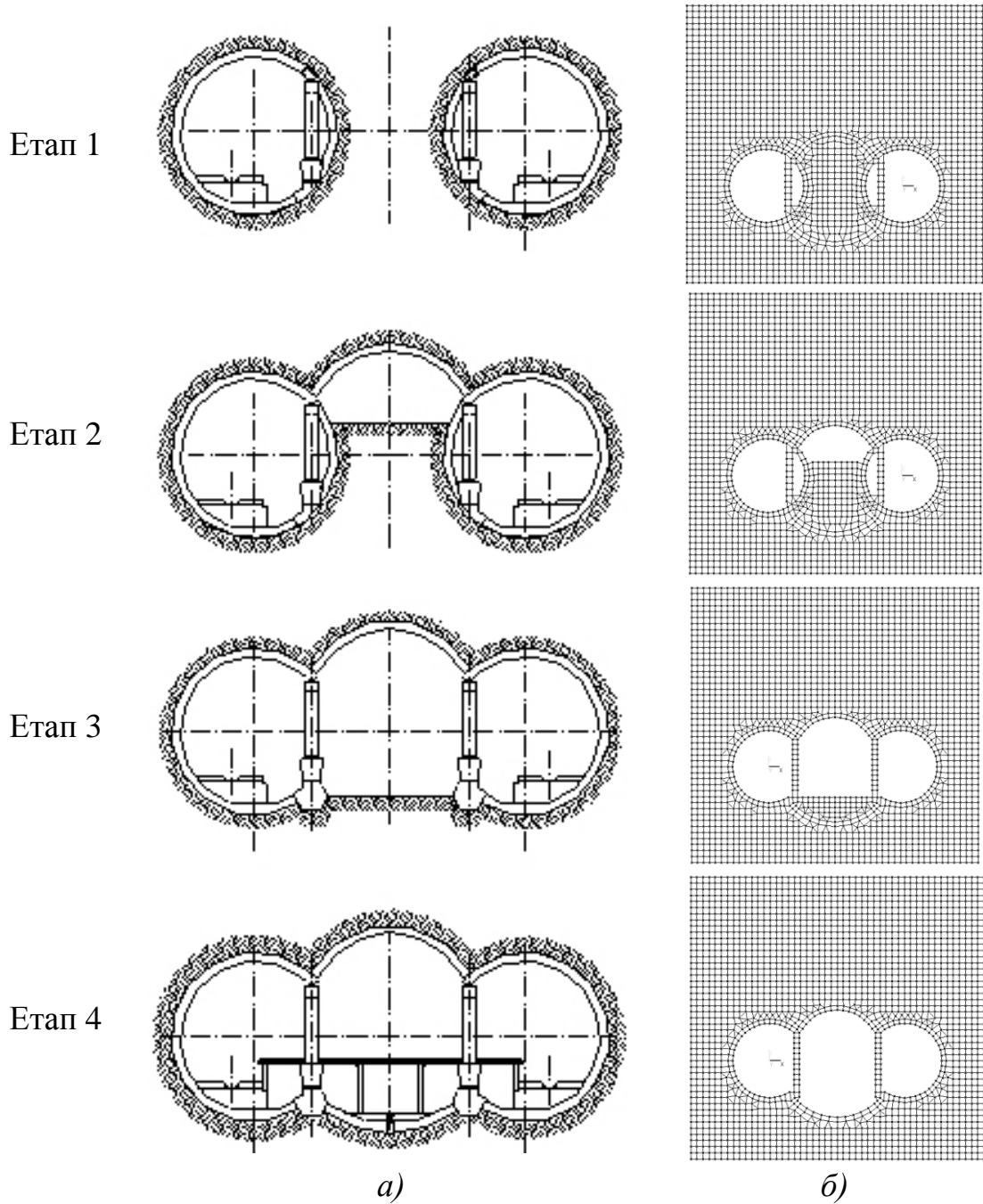


Рис. 18. Етапи спорудження станції (а) і відповідні їм СЕ-моделі (б)

Результатами досліджень доведено, що урахування технології робіт важливо, оскільки максимальні напруження в колонах і прогонах станції, як найбільш навантажених елементах, спостерігалися не в процесі експлуатації, а на третьому етапі (розкриття калоти), а побудовані графіки залежностей свідчать про значне зростання горизонтальних (до 3...3,4 раз) та вертикальних (до 2...2,9 раз) переміщень, а також зростання вертикальних та еквівалентних (до 1,1 раз) напружень (рис. 19).

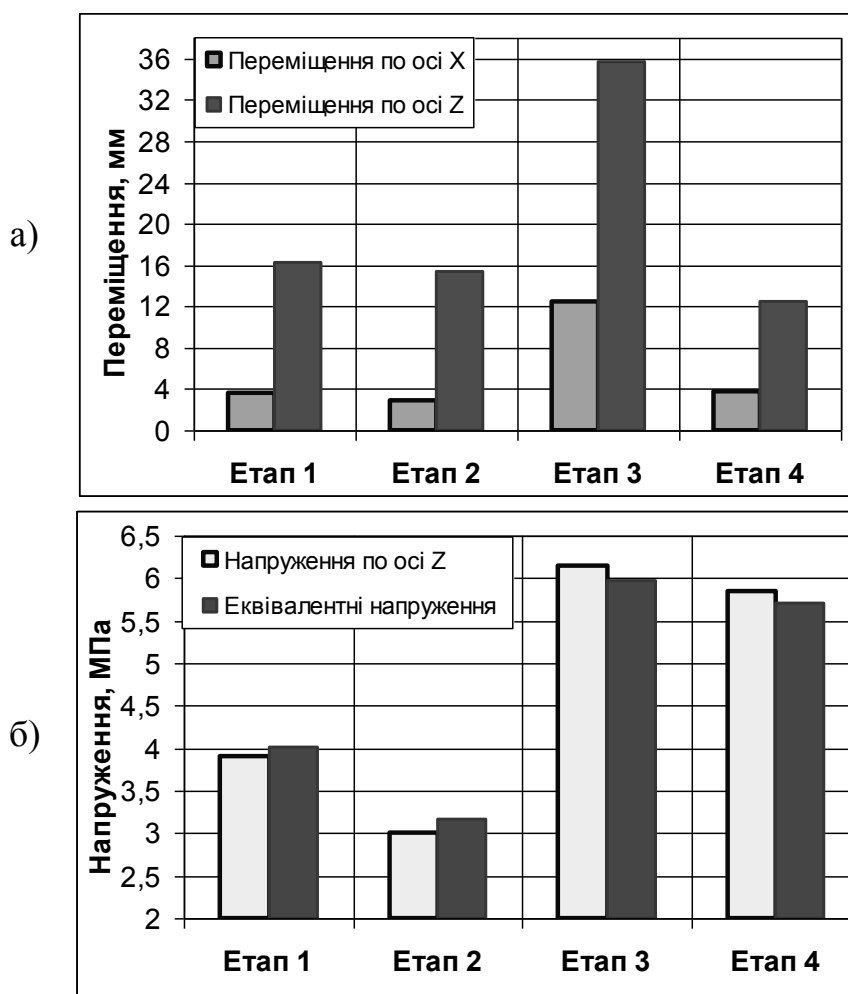


Рис. 19. Графіки залежності переміщень (а) та напружень (б) від технології спорудження колонної станції

Дослідження впливу кроку колон на загальне НДС дозволило одержати аналітичну залежність еквівалентних напружень від кроку колон, за допомогою якої ще на етапі проектування і приблизних розрахунків конструктивних елементів можна підібрати оптимальний крок колон без зниження загальної міцності станційної конструкції.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на підставі нових підходів до аналізу тунельних конструкцій, встановлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану підземних споруд та залежностей енергії для в'язко-пружно-пластичного середовища отримане нове рішення актуальної науково-практичної проблеми знаходження детальної інформації про поведінку конструкцій, що досліджуються, та проектування транспортних підземних об'єктів, котре складає теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій і має велике значення для освоєння підземного простору.

Основні наукові та практичні результати, висновки і рекомендації роботи полягають у наступному:

1. Розглянуті і проаналізовані методи визначення НДС тунельних конструкцій при статичних і динамічних навантаженнях дозволили зробити висновок, що загального систематизованого підходу до даної проблеми не існує, а безліч розроблених методів і методик є похідними і не дозволяють вирішити її в повному об'ємі з отриманням детальних достовірних результатів.

2. Встановлено, що принцип накладення деформацій дозволяє врахування як пружно-пластичних деформацій, так і деформацій, пов'язаних з реологічними явищами, відповідно до цього принципу розроблена методика розділення деформацій, а на основі цих теоретичних досліджень доведено, що на контурі закріпленої виробки має місце неоднорідність реологічних явищ, тобто і повзучість, і релаксація присутні одночасно.

3. Проведені одноосні і стабілометричні випробування на міцність і повзучість спондилової глини, результатами яких є деформаційні параметри, вживані потім як початкові дані для математичного моделювання.

4. Розроблені теоретичні основи енергетичного підходу до аналізу НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив», причому аналітичні залежності енергії одержані як для пружно-пластичної деформації, так і для реологічних явищ, що дозволяє якнайповніше врахувати особливості деформації оточуючого масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища.

5. Як натурний експеримент проведено інструментальні вимірювання деформацій оправи лівого перегінного тунелю між станціями «Либедьська»–«Диміївська» Київського метрополітену. Різниця між результатами складає 17,6...20 %, що надає змогу зробити висновок про задовільну збіжність одержаних результатів чисельного аналізу та результатів натурних досліджень.

6. На основі результатів порівняльного аналізу натурних і чисельних досліджень деформації кілець оправ ескалаторних тунелів на станціях «Сирець» і «Дорогожичи» Київського метрополітену доведено, що різниця складає 11...15 %, що свідчить про високу адекватність математичного моделювання реальній поведінці ескалаторних тунелів.

7. Вперше проведене дослідження форм і частот коливань конструкцій станцій колонного типу мілкового і глибокого закладення з урахуванням приєднаних мас ґрунту оточуючого масиву. В ході комплексного аналізу з'ясовано, що при мілкому і глибокому закладенні напруження і переміщення в оправах змінюються лінійно (при коефіцієнті кореляції не менше 0,98) незалежно від енергетичного рівня дій, що дозволяє обґрунтовано ухвалювати проектні рішення за складних умов роботи підземної споруди.

8. Вперше проведене дослідження випадку прогресуючого обвалення конструкцій станцій колонного типу мілкового і глибокого закладення при деградаційному руйнуванні колон. Критичний імпульс при ударних навантаженнях, що призводять до прогресуючого руйнування залізобетонних конструкцій колонних станцій мілкового закладення, знаходиться в межах 9000...12000 кН·м/с, що дозволяє визначати відстань між колонами, яка забезпечує міцність таких конструкцій в процесі експлуатації.

9. Вперше в рамках комплексного аналізу проведений динамічний аналіз конструкції пілонної станції, який включав модальний аналіз і дослідження ім-

пульсної дії, а також вплив метропроїзду на елементи конструкції. Дослідження впливу метропроїзду в статичній і динамічній постановках дозволило зробити висновок, що для станції пілонного типу такі розрахунки можуть вважатися перевірочними.

10. Встановлено, що на формування НДС системи «тунельна конструкція – оточуючий масив» значно впливають технологічні процеси проходки виробки, монтажу оправи і первинного нагнітання (зменшення до 1,45...4,8 раз для вертикальних напружень в порівнянні з експлуатаційною стадією).

11. Чисельний аналіз впливу технології спорудження станції метрополітену довів її вплив на формування НДС. Змодельовані чотири етапи спорудження станції, аналіз результатів дослідження яких дозволив зробити висновок про важливість урахування технології робіт, оскільки максимальні напруження в колонах і прогонах станції, як найбільш навантажених елементах, спостерігалися не в процесі експлуатації, а на третьому етапі (відкриття калоти середнього залу), причому горизонтальні і вертикальні переміщення цього етапу значно більше подібних переміщень 4 етапу, які вважаються експлуатаційними – до 3,4 і 2,9 разів відповідно.

12. Виконане дослідження впливу кроку колон на загальний НДС тунельної конструкції дозволило одержати лінійну аналітичну залежність еквівалентних напружень від кроку колон ( $\sigma_{екв} = 0,0535b + 2,0881$  при достовірності апроксимації  $R^2=0,98$ ), за допомогою якої ще на етапі проектування і початкових розрахунків конструктивних елементів можна підібрати оптимальний крок колон без зниження загальної міцності станційної конструкції.

13. Реалізація розроблених в дисертації рішень виконана Державною корпорацією «Укрметротунельбуд» (м. Київ) у вигляді методики дослідження НДС тунельних конструкцій, що дало можливість отримати економічний ефект у розмірі 419 970 гривень; у навчальному процесі ДНУЗТу при підготовці спеціалістів та магістрів спеціальності «Мості і транспортні тунелі»; при створенні нормативних документів ДБН В.2.3-2014. Транспортні тунелі. Норми проектування (проект) і ДБН Н.2.3-2014. Транспортні тунелі. Норми виконання і приймання робіт (проект); в науковій діяльності при виконанні НДР.

**Результати роботи і положення дисертації відображені у 69 наукових працях, основними з яких є наступні:**

1. Тютькін, О. Л. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін. – Д. : Наука і освіта, 2004. – 176 с.
2. Тютькин, А. Л. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Д. : Наука і освіта, 2005. – 252 с.
3. Тютькін, О. Л. Станції метрополітену: конструкції та спорудження: навчальний посібник / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін. – Д. : Вид-во «Нова ідеологія», 2012. – 164 с.
4. Тютькин, А. Л. Пространственный расчет станции метрополитена с интерпретацией окружающего массива как упруго-вязко-пластического / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин // Геотехнічна механіка. – Д. : Ін-т геотехніч-

- ної механіки НАН України, 2002. – Вип. 40. – С. 194-202.
5. Петренко, В. Д. Анализ реологических явлений вокруг выработки кругового очертания / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин // Будівництво. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2002. – Вип. 11. – С. 33-37.
  6. Тютькин, А. Л. Применение «фильтров» для углубленного анализа поведения системы «крепь-массив» в расчетах подземных сооружений / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2004. – Вип. 3. – С. 137-140.
  7. Тютькін, О. Л. Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану колонної станції метрополітену з двома видами колон / В. Д. Петренко, В. Л. Седін, О. Л. Тютькін, І. В. Старостенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 6/2004 (29). – С. 108-112.
  8. Тютькин, А. Л. Реализация свойств упруго-вязко-пластического массива с помощью «грунтовых» элементов / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, Т. А. Селихова. // Геотехнічна механіка. – Д. : Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2004. – Вип. 50. – С. 270-277.
  9. Тютькін, О. Л. Розрахунок ескалаторного тунелю із залізобетонною оправою МСЕ / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютькін. // Геотехнічна механіка. – Д. : Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2006. – Вип. 64. – С. 51-59.
  10. Тютькин, А. Л. Исследование основных параметров взрывного воздействия для практических расчетов прочности и устойчивости тоннельных конструкций / А. Л. Тютькин. Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2006. – Вип. 12. – С. 208-214.
  11. Тютькин, А. Л. Комплексный анализ конструкции колонной станции метрополитена / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко. // Науковий вісник НГУ. – Д. : НГУ, 2007. – № 9. – С. 61-65.
  12. Тютькин, А. Л. Анализ собственных форм и частот пилонной станции на основе пространственной модели / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Д. : ПГАСиА, 2007. – Вып. 43. – С. 353-359.
  13. Тютькин, А. Л. Исследование взаимодействия слоистого массива с конструкцией пилонной станции метрополитена / А. Л. Тютькин // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк : ДВНЗ ДонНТУ, 2007. – № 2. – С. 125-134.
  14. Тютькин, А. Л. Модальный анализ конструкции пилонной станции метрополитена с учетом присоединенных масс грунта / А. Л. Тютькин // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2007. – Вип. 18. – С. 167-171.
  15. Тютькин, А. Л. Сравнительный анализ результатов натурных исследований и математического моделирования перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко / Геотехнічна механіка. – Д. : Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2007. – Вип. 73. – С. 91-100.
  16. Тютькін, О. Л. Дослідження напружено-деформованого стану обробки пере-



- гінного тунелю із урахуванням технологічних процесів / О. Л. Тютькін // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2008. – Вип. 20. – С. 169-173.
17. Тютькин, А. Л. Численный анализ влияния импульсного воздействия на напряженно-деформированное состояние обделки пилонной станции / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин // Науковий вісник НГУ. – Д. : НГУ, 2008. – № 2. – С. 3-8.
  18. Тютькін, О. Л. Теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища / О. Л. Тютькін // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2008. – Вип. 21. – С. 201-206.
  19. Тютькин, А. Л. Численное обоснование выбора конструкции станции односводчатого типа в процессе проектирования / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Д. : ПГАСА, 2008. – Вып. 47. – С. 459-466.
  20. Тютькін, О. Л. Математичне моделювання впливу рухомого складу на конструкцію пілонної станції метрополітену / О. Л. Тютькін // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Гірничо-геологічна». – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – Вип. №7 (135). – С. 86-90.
  21. Тютькин, А. Л. Концепция статусности в комплексном анализе прочности конструкций подземных сооружений / А. Л. Тютькин. / Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2008. – Вип. 25. – С. 110-117.
  22. Тютькин, А. Л. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния конструкции колонной станции метрополитена в процессе ее сооружения / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко, Д. А. Кавун / Геотехнічна механіка. – Д. : Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2008. – Вип. 78. – С. 87-99.
  23. Тютькин, А. Л. Исследование влияния шага колонн на общее напряженно-деформированное состояние конструкции колонной станции / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». – Тула : Гриф и К, 2008. – Вып. 3. – С. 107-110.
  24. Тютькин, А. Л. Анализ прогрессирующего разрушения колонной станции мелкого заложения / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко. / Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». – Тула : Гриф и К, 2009. – С. 141-144.
  25. Тютькін, О. Л. Основи енергетичного підходу до аналізу напружено-деформованого стану системи «кріплення–масив» / О. Л. Тютькін // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2009. – Вип. 26. – С. 141-146.
  26. Тютькін, О. Л. Оптимізація геометричних параметрів тунельної конструкції колонної станції метрополітену / В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін, В. І. Петренко / Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Гірничо-геологічна». – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – Вип. 10(151). – С. 98-102.
  27. Тютькін, О. Л. Основи розрахунку тунельних конструкцій у випадку прогресуючого обвалення / О. Л. Тютькін // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во

ДНУЗТу, 2009. – Вип. 28. – С. 116-120.

28. Тютюкін, О. Л. Модальний аналіз колонної станції із врахуванням нелінійних властивостей та приєднаних мас оточуючого масиву / О. Л. Тютюкін // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2010. – Вип. 32. – С. 122-126.
29. Тютюкін, О. Л. Дослідження впливу рухомого навантаження на конструкцію колонної станції мілкового закладення / О. Л. Тютюкін // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Гірничо-геологічна». – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – Вип. №11 (161). – С. 112-119.
30. Тютюкін, О. Л. Комплексний аналіз колонної станції із варіацією глибини закладення / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, В. І. Петренко // Вісник ДНУЗТу. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2011. – Вип. 39. – С. 138-143.
31. Тютюкін, О. Л. Результати комплексного аналізу конструкції колонної станції мілкового закладення / О. Л. Тютюкін, К. Ю. Руденко // Науковий вісник ХНУБА. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 72. – С. 167-172.
32. Тютюкин А. Л. Численный анализ воздействия подвижной нагрузки на колонную станцию метрополитена / Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». Вып. 3. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 97-102.
33. Tiutkin, O. L. Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands / V. D. Petrenko, V. T. Huzchenko, O. L. Tiutkin, D. V. Tiutkin // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2014. – No 4(52). – pp. 127-138. (Наукометрична база Index Copernicus).
34. Тютюкин, А. Л. Комплексный динамический анализ пилонной станции метрополитена глубокого заложения / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 6, частина 1(89). – С. 80-85. (Наукометрична база Index Copernicus).
35. Тютюкін, О. Л. Дослідження впливу рухомого складу метропоїзду на напружено-деформований стан конструкції пілонної станції / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, В. І. Петренко // Мат. міжнар. конф. «Форум гірників-2007», 11-13 жовтня 2007 г. – Д. : Національний гірничий університет, 2007. – С. 101-106.
36. Тютюкин, А. Л. Исследование напряженно-деформированного состояния обделки перегонного тоннеля с учетом передвижения щита / А. Л. Тютюкин // Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Новые технологии подземного строительства и добычи полезных ископаемых», 11-13 апреля 2008 г., Алчевск. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2008. – С. 133-139.
37. Тютюкин, А. Л. Поэтапный анализ прогрессирующего разрушения конструкции станции метрополитена колонного типа / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко. // Мат. міжнар. конф. «Форум гірників-2008», 13-15 жовтня 2008 г. – Д. : Національний гірничий університет, 2008. – С. 163-167.
38. Тютюкін, О. Л. Комплексний аналіз станції метрополітену мілкового закладення / О. Л. Тютюкін // Тези 69 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 21-22 травня

2009 р., Дніпропетровськ. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2009. – С. 206-207.

- 39.Тютюкин А. Л. Решение задачи влияния подвижной нагрузки на конструкцию колонной станции мелкого заложения в динамической постановке / А. Л. Тютюкин // Тези 71 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15 квітня 2011 р., Дніпропетровськ. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2010. – С. 231.
- 40.Тютюкін О. Л. Динамічна постановка задачі рухомого навантаження / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін // Тези 73 Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 23-24 травня 2013, Дніпропетровськ. – Д. : Вид-во ДНУЗТу, 2013. – С. 188-189.

**Особистий внесок автора** в роботах, опублікованих в співавторстві: [1-3] – розробка методології досліджень, створення чисельних моделей, виконання розрахунків та аналіз результатів; [4, 5, 8] – формулювання ідеї та розробка основ розрахунку підземних споруд із розглядом оточуючого масиву як пружно-в'язко-пластичного середовища; [6] – розробка аналітичних положень критеріального аналізу; [7, 9, 22, 33, 37] – формулювання ідеї та постановка завдання досліджень, узагальнення та аналіз результатів; [11, 12, 17, 30, 31, 34, 35, 40] – постановка завдання для динамічного аналізу, формулювання принципів комплексного аналізу, обробка результатів, визначення закономірностей; [15] – аналіз результатів маркшейдерських досліджень, розробка методики визначення деформацій перегінних тунелів в процесі спорудження та експлуатації; [19, 23, 26] – створення чисельних моделей, розробка оптимізаційних критеріїв та аналіз результатів; [24] – створення чисельних моделей, дослідження процесу прогресуючого обвалення.

## АНОТАЦІЯ

Тютюкін О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.04 – Шахтне та підземне будівництво. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої проблеми в області розрахунків підземних споруд, а саме розробці теоретичних основ комплексного аналізу тунельних конструкцій.

Вперше для рішення задачі визначення напружено-деформованого стану оточуючого масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища запропонована методика розділення деформацій у відповідності із принципом їх накладення.

Розроблені теоретичні основи енергетичного підходу до аналізу напружено-деформованого стану системи «тунельна конструкція – оточуючий масив», отримані аналітичні залежності енергії для пружно-пластичної деформації та для реологічних явищ.

На основі теоретичних побудов комплексного аналізу тунельних конструкцій розроблені методи їх статичного та динамічного дослідження, причому їх

комплекс включає рухоме навантаження, ударне та імпульсне діяння, також розглянута можливість прогресуючого руйнування конструкції станції.

**Ключові слова:** тунельна конструкція, оточуючий масив, комплексний аналіз, напружено-деформований стан, енергетичний підхід, динамічний аналіз, технологічні процеси.

## АННОТАЦІЯ

Тютюкин А. Л. Теоретические основы комплексного анализа тоннельных конструкций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.04 – Шахтное и подземное строительство. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению важной проблемы в области расчётов подземных сооружений, а именно разработке теоретических основ комплексного анализа тоннельных конструкций.

Впервые для решения задачи определения напряжённо-деформированного состояния окружающего массива как вязко-упруго-пластической среды предложена методика разделения деформаций в соответствии с принципом их наложения.

Разработаны теоретические основы энергетического подхода к анализу напряжённо-деформированного состояния системы «тоннельная конструкция – окружающий массив», получены аналитические зависимости энергии для упруго-пластической деформации и для реологических явлений.

Были проведены натурные эксперименты в виде инструментальных измерений деформаций обделки перегонного тоннеля. Для проведения исследований адекватности разработанных в диссертационной работе теоретических основ комплексного анализа были проведены натурные эксперименты в виде инструментальных измерений деформаций обделки левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» Киевского метрополитена. После сравнения результатов натурных экспериментов и математического моделирования сделан вывод о высокой степени достоверности и адекватности авторских положений, так как относительная погрешность между результатами составляет 17,6...20 %.

Для более детального доказательства достоверности теоретических авторских положений проведен сравнительный анализ результатов натурных исследований деформирования колец обделки эскалаторных тоннелей на станциях «Сырец» и «Дорогожичи», причем погрешность между результатами инструментальных измерений и расчета МКЭ составляет 11...15 %, что свидетельствует о высокой адекватности математического моделирования реальному поведению эскалаторных тоннелей.

На основе теоретических построений комплексного анализа тоннельных конструкций разработаны методы их статического и динамического исследований, причем комплекс нагрузок включает подвижную нагрузку, ударное и им-

пульсное воздействия, также рассмотрена возможность прогрессирующего обрушения стационарной конструкции.

Впервые проведен динамический анализ конструкции пилонной станции, который включал в себя модальный анализ и исследование импульсного воздействия, а также влияние метропоезда на элементы конструкции.

Впервые проведено исследование форм и частот колебаний конструкций станций колонного типа мелкого и глубокого заложения с учетом присоединенных масс грунта окружающего массива. Как часть комплексного анализа, разработаны методы исследования стационарных конструкций на ударное воздействие (падение самолёта и вертолёт) и импульсное взрывное воздействие, причем практически данные методы реализованы впервые.

Численный анализ влияния технологии сооружения станции метрополитена доказал её влияние на формирование НДС, анализ его результатов позволил сделать вывод о важности учета технологии работ, так как максимальные напряжения в колоннах и прогонах станции, как наиболее нагруженных элементах, наблюдались не в процессе эксплуатации.

Исследование влияния шага колонн на общее НДС позволило получить аналитическую зависимость эквивалентных напряжений от шага колонн, с помощью которой еще на этапе проектирования и приблизительных расчетов конструктивных элементов можно подобрать оптимальный шаг колонн без снижения общей прочности стационарной конструкции.

Экономический эффект от внедрения докторской диссертационной работы составил 419 970 гривен.

**Ключевые слова:** тоннельная конструкция, окружающий массив, комплексный анализ, напряжённо-деформированное состояние, энергетический подход, динамический анализ, технологические процессы.

## ABSTRACT

Tjutjkin O. L. Theoretical bases of complex analysis of tunnel constructions. – As a manuscript.

The thesis for scientific degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.15.04. – “Mine and underground construction”. – State Higher Educational Institution “National Mining University”. – Dnipropetrovs’k, 2016.

The thesis is devoted to the decision of important problem in area of underground construction calculations, namely to development of theoretical bases of complex analysis of tunnel constructions.

The decision of task of tensed and deformed state determination of the surrounding array as viscous-elastic-plastic environment the method of division of deformations in accordance with principle of their superposition is offered.

Theoretical bases of power approach are developed to the tensed and deformed analysis of the system «tunnel construction – surrounding massif», analytical dependences of energy for elastic-plastic deformation and for the rheological phenomena are got.

On the basis of theoretical research of tunnel constructions complex analysis the

methods of their static and dynamic researches are developed, thus the complex of loadings includes the mobile loading, shock and impulsive influences, possibility of the making progress bringing down of the station construction is also considered.

**Keywords:** tunnel construction, surrounding massif, complex analysis, stress-strain state, energy approach, dynamic analysis, technological processes.

Тютькін Олексій Леонідович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ  
ТУНЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Автореферат

Підписано до друку \_\_\_\_\_ 2016 р. Формат 60×84/16.

Папір для множних апаратів.

Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9. Замовлення № \_\_\_\_\_

Тираж 120 прим.

Видавництво «Нова ідеологія»

Адреса видавництва та поліграфічної бази:

49044, м. Дніпропетровськ, вул. Кірова, 103.

тел./факс: (056) 745-07-07

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 191 від 20.09.2000 р.