

Триває до спеціалізованої  
вченої ради ДФ 08.084.034  
13.08.2024р.

**ВІДГУК**

Галова С.В.Р.

офіційного опонента,

д.т.н., проф. завідувача кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки

НТУ «Дніпровська політехніка», доктора технічних наук, професора

Банніков Д.О.

**Галєєва Сергія Миколайовича**

на дисертацію **Бондаренко Наталії Костянтинівни**

**«Параметричний аналіз напружено-деформованого стану  
горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом»,**

подану на здобуття ступеня «доктор філософії»

зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,

галузі знань 19 – Архітектура та будівництво

**Актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими  
темами, програмами та планами**

Визначення напружено-деформованого стану будь-якої будівельної конструкції є фундаментальною задачею, результати вирішення якої дозволяють оцінити міцність та стійкість. Для споруд, що взаємодіють з ґрунтом або гірською породою, зокрема підземних об'єктів метрополітену або транспортних тунелів, пошук напружень та деформацій ускладнюється з причини того, що оточуючий конструкцію масив не є лише навантаженням, а й тілом, що деформується, тобто неврахування його деформаційних характеристик призводить до одержання невірних результатів.

Горизонтальна виробка, наприклад, перегінний тунель метрополітену, взаємодіє з ґрунтовим або породним масивом, і формування напружено-деформованого стану є загальним, залежним від деформаційних характеристик кріплення тунелю і оточуючого ґрунту. Для випадку однорідного масиву, якщо горизонтальна виробка перетинає одну геологічну формацію, існують аналітичні формули Ламе для визначення напружень, за допомогою яких потім можна розрахувати й деформований стан.

Розрахункова ситуація значно ускладнюється, якщо масив є шаруватим, тобто складеним декількома геологічними формаціями. Для горизонтальної виробки в шаруватому масиві існує декілька аналітичних рішень, наприклад, Савіна, однак універсальна формула для визначення напружено-деформованого стану відсутня. Таке положення в розрахунку підземних споруд пояснюється об'єктивною причиною: у формуванні напружень і переміщень навколо виробки приймають участь усі шари, які вона перетинає, а кардинально різні їхні деформаційні характеристики не дозволяють з'ясувати однозначний їх вплив на загальну ситуацію.

Відповідно, логічним методологічним кроком, який зроблено авторкою дисертаційної роботи, є застосування чисельного аналізу на основі методу скінченних елементів. Однак, Бондаренко Н.К. не відкидає і аналітичні прийоми дослідження напружено-деформованого стану горизонтальної виробки в шаруватому масиві. Комбінація результатів, отриманих після чисельних розрахунків, і аналітичної обробки, яка надала можливість отримати закономірності напружень і переміщень, дозволила створити основи параметричного аналізу.

Взявши з аналітичного підходу до визначення напружено-деформованого стану горизонтальної виробки ідею застосування одиничних параметрів, як це використовувалося в рамках теорії конформних відображень, Бондаренко Н.К. реалізувала її в чисельному аналізі. Це надало їй змогу отримати не тільки теоретичні наукові результати, а й розробити методіку масштабування, яку в роботі названо «скейлінг». Ця методіка дозволяє отримувати рішення для широкого ряду змінних параметрів, маючи єдине первинне рішення, отримане за допомогою моделі з одиничними параметрами.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати є актуальними, оскільки вирішення поставленої задачі розробки теоретико-практичних основ параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом, важливе для обґрунтування

вибору розмірів незакріпленої виробки, геометричних параметрів несучої конструкції, її матеріалу, враховуючи наявність шаруватого масиву.

Дисертаційна робота Бондаренко Н.К. виконана відповідно до тематики науково-дослідних робіт Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) (до грудня 2021 року – Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ)), а саме держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) «Аналітичні закономірності напружено-деформованого стану оправи шахтних стовбурів при проведенні спеціальних робіт» (номер державної реєстрації 0117U006810), «Наукове обґрунтування інноваційних технологій відновлення об'єктів транспортної інфраструктури України» (номер державної реєстрації 0119U001139), «Математичне моделювання взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим масивом при будівництві залізничних тунелів» (номер державної реєстрації 0119U001140), «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна на 2021 рік» (номер державної реєстрації 0122U000381) та «Теоретико-практичні основи визначення напружено-деформованого стану в оправах підземних конструкцій метрополітенів» (номер державної реєстрації 0121U108031). Авторка була виконавицею робіт у вказаних НДР, результати дисертаційної роботи у вигляді основ параметричного аналізу застосовувалися під час роботи над ними. Кількість науково-дослідних робіт свідчить про те, що результати дисертаційної роботи Бондаренко Н.К. широко застосовувалися в практичному плані, що є позитивним моментом, що відповідно характеризує авторку і отримані нею наукові результати.

**Ступінь обґрунтованості основних наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації** забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, достатнім для вирішення задач в підземному будівництві рівнем володіння розрахунковим комплексом SCAD та



порівнянням результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з вимірюваннями переміщень оправи.

**Наукова новизна отриманих результатів** сформульована авторкою у вигляді двох наукових положень:

1. Вперше з коефіцієнтом кореляції  $R^2=0,97\dots0,99$  отримано закономірності напружень на контурі незакріпленої виробки в шаруватому масиві, які для трьох характерних точок є логарифмічними, а для двох точок мають лінійний характер, значення ж переміщень реальної закріпленої виробки на відміну від виробки з  $R=1$  збільшуються в стільки разів, наскільки збільшується модуль пружності матриці при незмінному рівні напружень.

2. Вперше визначено, що для отримання напружень і переміщень незакріпленої виробки в шаруватому масиві будь-якого радіусу слід збільшити напруження в  $n$  разів (де  $n$  – відношення радіусів), а переміщення – в  $n^2$  разів системи з одиничним радіусом  $R=1$ , тобто достатньо розрахувати лише один випадок шаруватості із визначеною товщиною шару та відношенням модулів пружності матриці і шару, щоб визначити напружено-деформований стан виробок з іншими геометричними і деформаційними параметрами.

Слід відмітити, що отримані положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, ґрунтуються на масиві результатів чисельного аналізу, який проведено на основі розроблених скінченно-елементних моделей. Ці результати отримали узагальнення і надали можливості відшукати закономірності напружено-деформованого стану, які також придатні для подібних систем, що мають інші вихідні дані. Функціональний характер вказаних закономірностей дозволяє оцінити зміну деформаційних параметрів системи і однозначно має наукову новизну.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці положень параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки в шаруватому масиві, який дозволяє отримувати переміщення та напруження на коловій виробці із одиничним радіусом та за допомогою

авторських параметрів екстраполювати його на вироби будь-якого радіусу, а також в практичних розрахунках для незакріпленої виробки при різних значеннях уведеного авторкою  $\chi$ -параметру ( $\chi$ -параметр – відношення модулів пружності матриці і шару) та для закріпленої за допомогою  $\kappa$ -параметру ( $\kappa$ -параметр – відношення модулів пружності конструкції і матриці) визначати НДС горизонтальної виробки і виконувати підбір матеріалу оправи.

Методика, що розроблена Бондаренко Н.К. на основі отриманих закономірностей напружено-деформованого стану, дозволяє виконання практичних розрахунків горизонтальних виробок в шаруватому масиві, що характеризує практичне значення як таке, що має високий рівень реалізації.

### **Аналіз основного змісту дисертаційної роботи**

Дисертація написана державною мовою з дотриманням наукового стилю викладення. Викладання наукових положень і висновків забезпечує доступність їх сприйняття та осмислення матеріалів дослідження. В тексті роботи використовується загальноприйнята науково-технічна термінологія.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг – 128 сторінок, з них 102 сторінки основного тексту, 52 рисунки на 46 сторінках, 4 таблиці на 4 сторінках, список використаних джерел з 99 назв на 11 сторінках.

У вступі дисертаційної роботи наведено об'єктивні дані про її актуальність, наукову новизну і практичне значення; наведено мету, об'єкт, предмет та методи дослідження і відомості про участь здобувачки в науково-дослідних роботах, а також наведено перелік завдань, вирішених в дисертації, основними з яких є:

– створити скінченно-елементні моделі системи «горизонтальна виробка – породний масив», які дозволяють варіацію радіусу виробки та деформаційних властивостей шаруватого масиву, зокрема моделі з одиничними параметрами;

– розробити основи параметричного аналізу визначення напружено-деформованого стану горизонтальної незакріпленої або закріпленої виробок;

– виконати параметричний аналіз деформованого стану закріпленої виробки, увівши поняття еквівалентної жорсткості оправи, та отримати закономірності її напружено-деформованого стану в шаруватому масиві;

– провести порівняння результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з інструментальними вимірюваннями і оцінити достовірність розробленої авторкою системи параметричного аналізу.

В першому розділі для окреслення області, в якій формулюється мета та ідея дисертаційної роботи, проведений аналіз науково-технічної задачі спорудження горизонтальної виробки під час щитової проходки. При всіх відомих перевагах щитова проходка в слабких та шаруватих масивах, навіть при наявності спеціалізованих прохідницьких щитів, має деякі проблеми, які проаналізовано. Детально проаналізовано методологічні підходи до шаруватості гірського масиву, ослабленого горизонтальною виробкою, які надали змоги свідчити, що саме чисельний підхід з урахуванням певних елементів аналітичних досліджень дозволить вирішити поставлену задачу.

У другому розділі викладено основи параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки в шаруватому масиві. Для цього розроблені скінченно-елементні моделі незакріпленої та закріпленої виробки, оскільки параметричний аналіз в авторському тлумаченні базується на застосуванні методу скінченних елементів. Авторкою вводиться  $\chi$ -параметр ( $\chi$ -параметр) як основа параметричного аналізу незакріпленої виробки в шаруватому масиві, що підкреслює оригінальність і цільність наукової ідеї.

В третьому розділі проведено параметричний аналіз закріпленої виробки, що залягає в шаруватому масиві і отримані закономірності її напружено-деформованого стану. Уведено  $\kappa$ -параметр (каппа-параметр), який є основою параметричного аналізу закріпленої виробки в шаруватому масиві. Таким чином, створена система масштабних параметрів, які дозволяють віднайти напруження і переміщення на моделях з одиничними параметрами і перенести їх на інші розрахункові випадки.

В четвертому розділі проведене порівняння результатів параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену з інструментальними вимірюваннями, яке доводить високий ступінь адекватності розроблених авторкою теоретико-практичних положень параметричного аналізу, оскільки похибка між вертикальними переміщеннями, отриманими в ході математичного моделювання та маркшейдерських вимірювань, складає 3,0...14,5 %.

Висновки дисертаційної роботи в чіткому та структурованому вигляді надають інформацію про виконані в дисертаційній роботі дослідження. Список використаних джерел ґрунтується на сучасних роботах, які надають змогу оцінити стан науково-технічної задачі, що вирішена в дисертаційній роботі.

### **Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у фахових виданнях**

За темою дисертації Бондаренко Н.К. опубліковано 12 наукових публікацій, що повно розкривають основний зміст дисертаційної роботи та є апробацією результатів, отриманих при підготовці дисертаційної роботи, з яких 3 фахові статті в журналах категорії «Б», 1 стаття, яка опублікована у періодичному виданні, що індексуються у наукометричних базах Scopus або WoS, та 8 тез доповідей (з яких 3 індексуються у наукометричній базі Scopus).

Такий рівень публікаційної та апробаційної діяльності Бондаренко Н.К. характеризується як високий та достатній для ознайомлення наукової спільноти з основними науковими результатами, отриманими в рамках дисертаційної роботи.

### **Зауваження по роботі**

Проаналізувавши основний зміст дисертаційної роботи Бондаренко Н.К., слід також надати зауваження, які носять дискусійний характер і не знижують рівень наукової новизни та практичної значимості отриманих результатів:

1. На рисунках 1.6 і 1.7 наведено модель, в якій шар має похиле залягання, однак в дисертаційній роботі всі проаналізовані випадки характеризуються



горизонтальним заляганням шарів. Незрозуміло, чому авторка не проаналізувала випадки, коли шар має деякий кут до горизонту?

2. Друге наукове положення базується на результатах п. 2.3, тобто первинному параметричному аналізі напружено-деформованого стану на основі моделі з одиничними параметрами, однак в дисертаційній роботі не вказані межі модулю пружності  $E$  та щільності матеріалу  $\gamma$  (породи або ґрунту), в яких застосування авторських формул буде коректним.

3. Під час уведення масштабних параметрів для незакріпленої ( $\chi$ -параметр) та закріпленої ( $\kappa$ -параметр) в моделі наявний лише один шар, характеристики якого відмінні від оточуючого масиву (матриці). Чи коректно застосовувати вказані параметри, якщо шарів буде два або більше?

4. В третьому розділі наведено (цитую): «В моделі породного масиву зроблено отвір радіусом  $R=1,0$  м з оправою товщиною  $h$ , що дорівнює  $0,1$  м (модель з одиничним геометричним параметром)», але, якщо заявлена модель саме з одиничним параметром, чому товщина оправи не дорівнює  $1$  м?

5. Уведений в параметричний аналіз закріпленої виробки в шаруватому масиві  $\kappa$ -параметр визначається як відношення модулів пружності конструкції і ґрунтової матриці. Чи має він зв'язок з  $\chi$ -параметром?

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Бондаренко Наталії Костянтинівни на тему «Параметричний аналіз напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом» є завершеним дослідженням, виконаним самостійно. В дисертації отримані нові наукові результати, що дозволили досягти поставленої мети розробки теоретико-практичних основ параметричного аналізу напружено-деформованого стану горизонтальної виробки, що взаємодіє із шаруватим масивом.

За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю та практичним значенням здобутих результатів дисертаційна робота відповідає змісту спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія й напряму наукових



досліджень освітньо-наукової програми «Будівництво та цивільна інженерія» Українського державного університету науки і технологій, а також вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її авторка, Бондаренко Наталія Костянтинівна, заслуговує на присудження наукового ступеня «доктор філософії» за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри будівництва,  
геотехніки і геомеханіки  
Національного технічного  
університету «Дніпровська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України,  
доктор технічних наук, професор



Сергій ГАПЄСВ

