

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**НІКІТЕНКО КІРА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 528.48

**МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ ПРИ ПРОВЕДЕННІ  
МОНІТОРИНГУ НА СТАДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО  
ГАЗОПРОВОДУ**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук, професор Староверов Володимир Сергійович, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри інженерної геодезії, м. Київ.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор Тревого Ігор Севірович,  
Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри геодезії, м. Львів;

кандидат технічних наук, доцент Бачишин Богдан Дмитрович, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри землеустрою, геодезії та геоінформатики, м. Рівне.

Захист відбудеться «30» квітня 2021 р., о 14:00 годинні на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд.466.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «27» березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

 О. П. Ісаєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасний стан газопровідної інфраструктури України потребує великого обсягу робіт для розв'язання проблем із забезпеченням надійного функціонування і підвищенням комплексної безпеки і стійкості газопроводу та його об'єктів. Обов'язковою умовою безаварійної експлуатації магістральних газопроводів є виконання геодезичного моніторингу.

Геодезичний моніторинг дає змогу визначати величину, напрями і швидкість деформаційних зміщень (горизонтальних і вертикальних) газопроводу та інші характеристики. Для успішного геодезичного моніторингу важливим є розв'язання проблеми розроблення технології його виконання і призначення точності спостережень, достатньої для прогнозування подальших деформаційних процесів.

Проблемою моніторингу займалися такі провідні вчені і фахівці, як М. Г. Відуєв, Р. М. Заріпов, Л. М. Перович, І. Л. Перович, І. Е. Субботін, В. К. Чибіряков, А. М. Шаммазов.

Проблему точності геодезичних спостережень за станом газопроводів досліджували П. П. Бородавкін, О. М. Іванцов, А. В. Рудаченко, П. Г. Швердін та інші.

Виконана робота ґрунтується на доробку відомих науковців Б. Д. Бачишина, К. О. Бурака, С. П. Войтенка, А. І. Єгоров, С. В. Староверова, А. С. Мазницького, І. С. Тревого, Р. В. Шульца, Н. Н. Хренова, у працях яких висвітлено деякі аспекти геодезичних спостережень за зсувами та геологічні ризики на трасі газопроводу, а також проблеми цифрової системи збору інформацій за допомогою комп'ютерних технологій для оперативного опрацювання результатів вимірювань, отриманих в процесі геодезичного моніторингу.

Однак дослідження згаданих учених потребують уточнення і подальшого розвитку, оскільки не повною мірою відображають ризики, що виникають внаслідок взаємодії газопроводу з ґрунтом на зсувонебезпечних ділянках траси.

Дослідницькі здобутки згаданих фахівців дали можливість сформулювати основні наукові завдання даної роботи.

Актуальним завданням роботи є використання досить простої і в той же час достатньо адекватної розрахункової моделі магістрального газопроводу, яка дає змогу оцінювати рівень його напружено-деформованого стану, що потрібно для визначення оптимальної точності геодезичного моніторингу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до державних, галузевих і науково-дослідних програм на підставі таких документів:

1. Закон України «Про трубопровідний транспорт» N192/96-ВР від 15.05.2006 р..
2. Постанови Кабінету Міністрів України від 04.08.2000 р. № 1214 «Про затвердження переліку об'єктів та окремих територій, які підлягають постійному та обов'язковому на довіреній основі обслуговуванню державними аварійно-рятувальними службами».
3. Постанови Кабінету Міністрів України від 16.11.2002 р. № 1747 «Правила

охорони магістральних трубопроводів».

4. Постанови Кабінету Міністрів України від 22 серпня 2000 р. № 1313 «Програма запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру на 2000-2005 роки».

5. «Моніторинг та прогнозна оцінка стану природних систем та природно-техногенних комплексів на основі моделювання геологічних процесів» (2008 – 2010рр., держ. реєстр. № 0108U010311) ТОВ «ИТ-транзит».

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення науково – прикладного завдання моделювання точності геодезичних спостережень при проведенні геодезичного моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу.

Для досягнення поставленої мети в дисертації були поставлені такі завдання:

- проаналізувати вплив геологічних чинників на функціонування магістрального газопроводу та розробити метод визначення геологічних і техногенних факторів ризику;
- обґрунтувати інноваційну доцільність диференціації точності результатів геодезичних спостережень у визначенні рухів земної поверхні, спричинених геологічними і техногенними факторами;
- розробити математичні моделі розрахунку точності геодезичного моніторингу на основі фізичної моделі напружено-деформованого стану магістрального газопроводу;
- розробити ефективний метод розв'язання системи складних диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану газопроводу з будь-якими граничними умовами для отримання вихідних параметрів розрахунку точності геодезичного моніторингу;
- удосконалити методику моделювання геодезичної точності спостережень за переміщеннями газопроводу;
- розробити метод визначення періодів спостережень за переміщенням ґрунтової основи та магістрального газопроводу.

**Об'єктом дослідження** є підземний магістральний газопровід.

**Предмет дослідження** — методи визначення точності геодезичних робіт при моніторингу магістрального газопроводу.

**Методи дослідження.** У дослідженні використано сучасні математичні методи. Методологічною основою дослідження є принципи і положення будівельної механіки, метод скінченних елементів, методи аналізу й результати досліджень попередників, методику геодезичного моніторингу експлуатаційної надійності газопроводів, методи математичної статистики та теорію похибок вимірювань.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в отриманні нової теоретичної основи розв'язання науково-прикладної задачі з розроблення методики і технології моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу магістрального газопроводу, а саме:

1. Розроблено математичну модель розрахунку точності геодезичного моніторингу на основі фізичної моделі напружено-деформованого стану магістрального газопроводу.

2. Удосконалено модель визначення періодів спостережень за переміщенням

грунтової основи та магістрального газопроводу, що дає змогу обґрунтовано встановити потрібну відстань між маркерами та із відповідною точністю визначати положення газопроводу в реальному часі.

3. Розроблено методика моделювання геодезичної точності спостережень за переміщеннями газопроводу, це дає можливість обґрунтовано підійти до вибору місць і точності геодезичних спостережень за деформуванням газопроводу.

4. Запропоновано метод визначення геологічних-техногенних факторів ризику під час експлуатації магістральних газопроводів, що дало змогу виявити ділянки підвищеного ризику та вперше побудувати апроксимаційну функцію математичного очікування щодо кожного чинника ризику.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробленні та вдосконаленні геодезичних методик контролю експлуатаційної надійності газопроводів та алгоритму виявлення геологічних-техногенних чинників ризику в процесі експлуатації магістральних газопроводів; в розробленні розрахункових схем можливих варіантів моніторингу; моделюванні точності геодезичних робіт та обґрунтованому розв'язанні цих задач.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі, були отримані автором самостійно.

В опублікованих у співавторстві наукових працях визначено загальний підхід до моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу лінійних споруд [2]; виконано верифікацію геологічних та техногенних чинників ризику при експлуатації магістральних трубопроводів [18]; запропоновано порядок визначення напружено-деформованого стану лінійних споруд в ґрунтовій основі [1]; виконано оцінку напружено-деформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної точності вимірювання [6]; обґрунтовано точність геодезичних спостережень за станом магістрального газопроводу на підставі визначення напружено-деформованого стану внаслідок одночасних деформацій розтягу – стиску та прогину його осі [7]; структуровано перехід від інтегрального оцінювання напружено-деформованого стану газопроводу до визначення точності геодезичних робіт [17]; запропоновано застосування методів дистанційного контролю під час моніторингу магістральних газопроводів [13].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження були викладені в доповідях та обговорені на шести щорічних науково-практичних конференціях в Київському національному університеті будівництва і архітектури (м. Київ, 2011-2015р.р.); Міжнародній науковій-практичній конференції «Сучасна землевпорядна наука: сьогодення та перспективи розвитку» (11-12 березня 2020 року, Білоцерківський національний аграрний університет) за таким напрямом: 1. Моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу. 2. Інноваційна диференціація точності результатів геодезичних спостережень на аварійно небезпечних ділянках магістрального газопроводів; Міжнародному форумі ГОСТРОЙ – 2020 «Моделирование точности геодезических наблюдений при проведении мониторинга состояния магистральных газопроводов» (29 березня 2020 р., м. Новосибірськ).

Результати дисертації впроваджено:

- в навчальний процес на кафедрі з дисципліни «Інженерна геодезія» КНУБА (розділ «Проектування і будівництво лінійних споруд»);
- в організації ТОВ «Ит-транзин» (Акт про впровадження Вих. №14/2020 від 20 лютого 2020 року).
- 2009 р. Проектування магістрального газопроводу «Богородчани — Ужгород» (Україна) - Договір №17.0412 між ПАТ "ІВП" ВНПТРАНСГАЗ" та НАК «Нафтогаз України».
- 2009 р. — Паспортизація технологічних об'єктів газотранспортної мережі для управління технологічного зв'язку ТОВ «Газпром трансгаз Сургут» ВАТ «Газпром» (Росія) — Договір №16.0906 та №16.1002 між ПАТ "ІВП" ВНПТРАНСГАЗ" та ТОВ «Газтранзит».
- 2009 р. — Паспортизація компресорних станцій ТОВ «Газпром трансгаз Сургут» ВАТ «Газпром» (Росія) — Договір №16.0906 та №16.0907 між ПАТ "ІВП" ВНПТРАНСГАЗ" та ТОВ «Газтранзит».
- 2010-2011 рр. — Виконання земельно-кадастрових робіт для магістральних газопроводів Бібрського, Гайсинського ЛПУ ДК «Укртрансгаз» (Україна) - Договір №16.0910 між ПАТ "ІВП" ВНПТРАНСГАЗ" та ДК «Укртрансгаз».
- 2012-2013 рр. — Наповнення геоінформаційної системи магістральних газопроводів ТОВ «Газпром трансгаз Сургут» ВАТ «Газпром» (Росія) — Договір №3/11 між ТОВ «ИТ-ТРАНЗИТ» та ТОВ «Газтранзит».
- 2014-2016 рр. — Виконання земельно-кадастрових робіт по «Гольятті — Горлівка — Одеса» — Договір №01/14 між ТОВ «ИТ ТРАНЗИТ» та УДП «Укрхімтрансміак».

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 22 статті, зокрема 16 – у наукових фахових виданнях, що входять до переліку видань, визначених МОН України, 2 – у наукових фахових іноземних виданнях, що індексуються в наукометричних базах (Web of Science; Scopus,Q3), 2 – у збірниках матеріалів конференції, 2 – в інших наукових виданнях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 163 сторінки, зокрема 141 сторінка основного тексту, 55 рисунків та 23 таблиці, містить список використаних джерел обсягом 134 найменування на 15 сторінках та додатки на восьми сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, окреслено зв'язок з науковими планами і темами дослідницької роботи, сформульовано мету і задачі дослідження та розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі «**Аналіз сучасних підходів до моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу магістральних газопроводів**» проаналізовано сучасні методи геодезичного моніторингу за переміщеннями магістральних газопроводів.

Недоліки застосовуваних методів геодезичного моніторингу газопроводів полягають в тому, що вони, не дають змоги безперервно отримувати інформацію про стан середовища і геологічні процеси поблизу газопроводу.

Досі не сформовано комплекс законодавчої, нормативної та науково-технічної документація, в якій була б чітко регламентована точність геодезичних робіт та порядок гарантування безпеки об'єктів системи магістральних газопроводів у разі виникненні надзвичайних і аварійних ситуацій. Згадані недоліки нормативно-технічного забезпечення свідчать про підхід, при якому за якого гарантування безпеки газопроводу не розглядається на стадії експлуатації. В жодному технічному документі не відображено питання проблеми побудови моделі взаємодії газопроводу з навколишнім середовищем в різних кліматичних та складних умовах, а також за різних соціально-економічних умов. Отже, наявно нормативна і регламентна документація потребує ретельного доопрацювання.

Крім того, не розроблено чіткого алгоритму оцінювання похибок розрахункових характеристик, застосовуваний нині алгоритм є наближеним, умовним у тому, що стосується напружено-деформованного стану (НДС) газопроводу та різних варіантів комбінування і способів геодезичного моніторингу для розвантаження газопроводів від надмірних напруг. Найточніше напружено – деформований стан газопроводу може бути визначений, тільки зважаючи на одночасні деформації труби та навколишнього ґрунту.

Сформульовано висновок про потребу в подальших дослідженнях проблеми моделювання точності геодезичних робіт під час геодезичного моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу.

Розглянуто питання, пов'язані із застосуванням сучасних приладів і систем автоматичного проектування з відповідним програмним комплексом для геодезичного моніторингу газопроводів. Світові тенденції розвитку дистанційного зондування набувають особливого значення в екологічному аспекті, тобто у виявленні витоків і аварійних викидів газопродуктів і кількісному оцінюванні масштабів забруднення.

Останнім часом накопичено чималий обсяг інформації про вплив факторів геологічного середовища на моніторинг газопроводів, але бракує досвіду моделювання та оцінювання впливу окремих чинників та їх можливих комбінацій, здатних призвести до напруги і деформації поверхні ґрунту недопустимих величин та зміщення підземних газопроводів. Тому зростає необхідність прогнозувати виникнення і перебіг небезпечних природно-техногенних геологічних процесів в зоні, прилеглої до газопроводу, та обґрунтовувати точність геодезичних спостережень на небезпечній ділянці газопроводу.

Оскільки встановлено, що на точність геодезичних робіт великою мірою впливають геологічні та техногенні фактори, у роботі визначено ступінь впливу природо-техногенних систем на стан газопроводу.

У другому розділі **«Розробка комплексної моделі оцінки впливу геологічних та техногенних чинників ризику при проведенні моніторингу магістральних газопроводів»** виконано аналіз впливу геологічних чинників на функціонування магістрального газопроводу. Для цього був створений метод визначення геологічних-техногенних факторів ризику та встановлено

співвідношення між вхідними факторами (фактори геологічного чинника ризику) та вихідною реакцією конструкції (зміщення трубопроводу), що є потрібним для проведення геодезичного моніторингу.

Найбільшу небезпеку для лінійної частини магістральних газопроводів становить наявність ділянок газопроводу в напружено-деформованому стані, причиною яких є геологічні впливи (утворення зсувів, селевих явищ, розтріскування ґрунту та інші процеси). Актуальність завдання полягає у визначенні методу кількісного оцінювання геологічної складової ризику, яку слід мати на увазі під час експлуатації магістрального газопроводу.

Положення магістрального газопроводу пов'язане з геологічною характеристикою тих районів, де прокладено газопровід.

Проаналізовано стан траси магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород» та виявлено вплив геологічних чинників на причини відмови у його роботі, що дало змогу визначити кількість небезпечних ділянок вздовж траси газопроводу.

Для цих ділянок газопроводу між компресорними станціями виконано оцінювання впливу геологічних та техногенних чинників ризику та побудовано діаграму їх розподілу (рис. 1).

Виявлення найбільш небезпечних ділянок газопроводу дало можливість призначити точність геодезичних робіт в першому наближенні (рис. 2) у разі зміщення газопроводу в вертикальній площині.

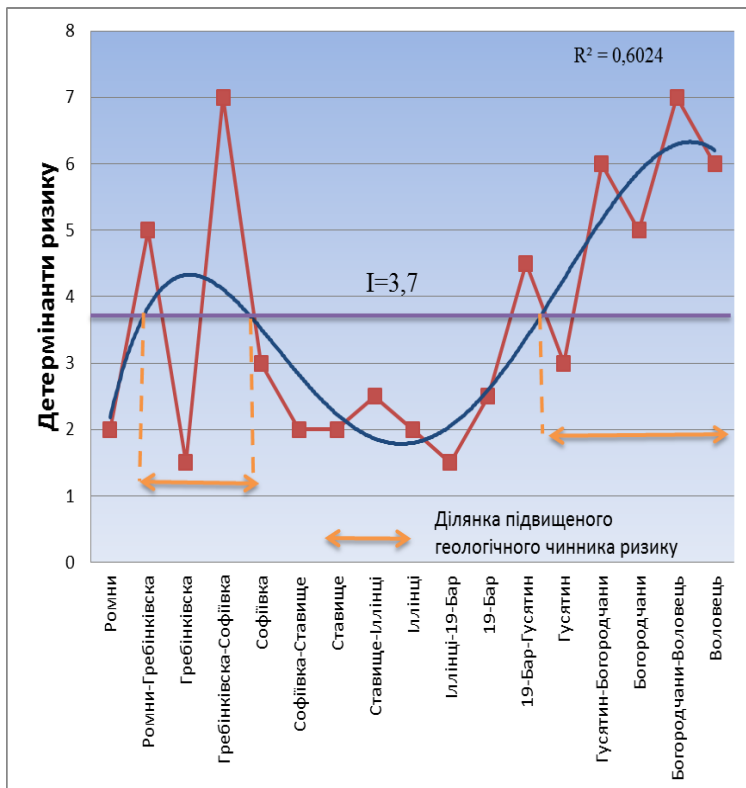


Рис. 1. Розподіл геологічних та техногенних чинників ризику

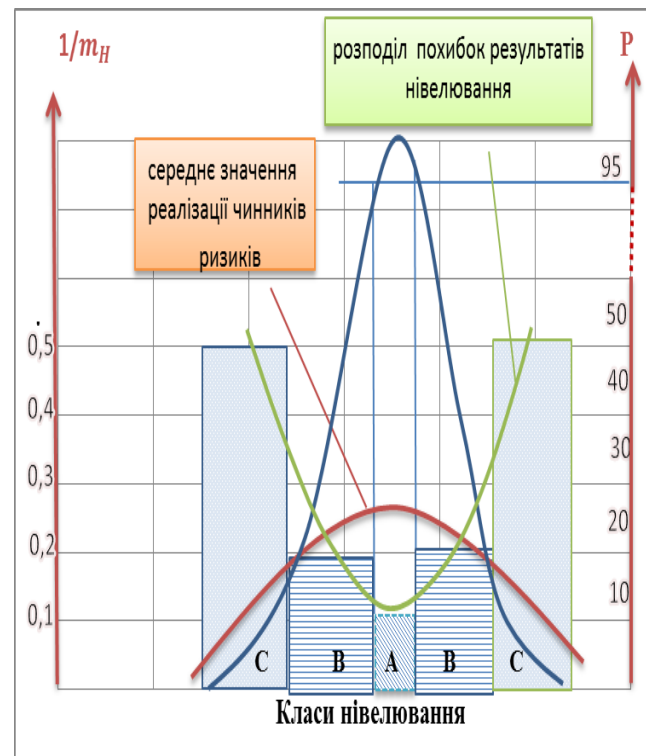


Рис. 2. Розподіл геологічних чинників ризику та допустимих похибок у результаті нівелювання



Це стало підставою для висновку проте, що точність геодезичних робіт залежить від ступеня деформації ґрунтового масиву: що менші деформації, то вища точність геодезичних робіт.

Розроблений метод комплексного оцінювання геологічних чинників ризику є основою для визначення небезпечних ділянок газопроводу, щодо яких потрібно виконати розрахунок напружено-деформованого стану.

У третьому розділі «**Розрахунок елементів напружено-деформованого стану (НДС) магістральних газопроводів в ґрунтовій основі**» було виконане оцінювання напружено-деформованого стану магістральних газопроводів за допомогою методів розрахункового та математичного моделювання з подальшим розв'язанням крайових задач з метою визначити місця максимально допустимих напружень, а для кожної ділянки газопроводу — можливі характеристики деформацій.

Отримані дані дозволили обґрунтовано обрати місця встановлення контрольних марок для геодезичного моніторингу газопроводу, визначити належну точність вимірювань й оцінити загальний стан будівельної конструкції на момент спостережень.

Запропоновано новий підхід до застосування сучасних технологій, в основу яких покладено науково обґрунтовану методику моделювання точності геодезичних спостережень.

Методику основанийо на розробці розрахункової і математичної моделі досліджуваного об'єкта, що уможливило перехід від визначення напружено-деформованого стану газопроводу до точності геодезичних спостережень.

Як математичну модель запропоновано використовувати фізичну модель «балка на пружній основі», яку описують диференціальним рівнянням четвертого ступеня

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw(x) = q(x), \quad (1)$$

де  $EI$  – жорсткість труби на згин;  $q$  – навантаження;  $k = k_0 \cdot h_{сл.}$  – погонний коефіцієнт постелі;  $I$  – основний момент інерції труби:

$$I = \frac{\pi}{64} (d_{зов}^4 - d_{внут}^4). \quad (2)$$

Коефіцієнт постелі визначають за усередненими значеннями модуля деформації і коефіцієнтом Пуассона для ґрунту:

$$k_0 = \frac{E_{гр}}{H_c(1 - 2m_{гр}^2)}, \quad (3)$$

де  $E_{гр}$  – модуль деформації;  $m_{гр}$  – коефіцієнт Пуассона;  $H_c$  – глибина стисненої товщі.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь з граничними умовами застосовують метод дискретної ортогоналізації С. К. Годунова, на підставі якого була розроблена програма розрахунку балки на пружній основі. Розрахунковою математичною моделлю газопроводу є система звичайних диференціальних рівнянь, розрахункові функції яких повинні задовольняти певні граничні умови, що впливають з умов закріплення газопроводу.

Система диференціальних рівнянь має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dx} = \frac{N}{EF} \\ \frac{dw}{dx} = \varphi \\ \frac{d\varphi}{dx} = -\frac{M}{EI_x} \\ \frac{dN}{dx} = -k \cdot U - q(x) \\ \frac{dQ}{dx} = \begin{cases} -q(x) + k \cdot w(x) & (x < a) \\ -q(x) + k \cdot w(x) + k_3 \cdot w_3(x) & (x > a) \end{cases} \\ \frac{dM}{dx} = Q \end{array} \right. \quad (4)$$

У розв'язку цієї системи відповідно до конкретних граничних умов одержуємо різні величини  $dU$ ,  $dw$ ,  $d\varphi$ ,  $dN$ ,  $dQ$ ,  $dM$ ; це дає можливість диференційовано підходити до обґрунтування точності геодезичних робіт.

Розглянуто різні варіанти розміщення газопроводу в ґрунті (зміни товщини шару ґрунту над ним, зміни фізичних характеристик ґрунту внаслідок замочування, можливі зсуви ґрунту в гірських районах та інше) і виконано розрахунок характеристик напружено-деформованого стану (рис. 3).

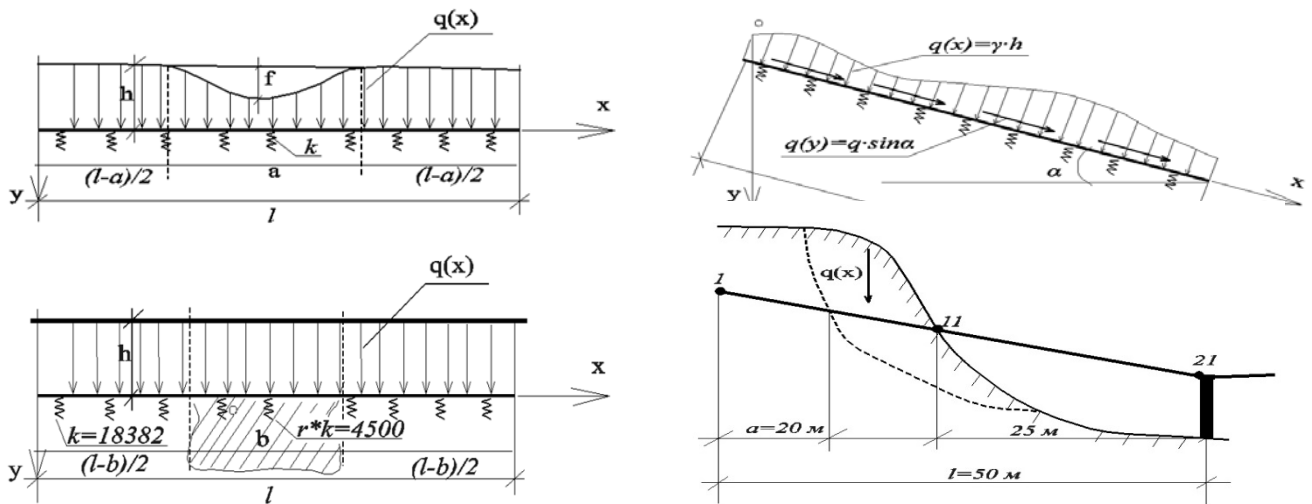


Рис. 3. Розрахункові моделі магістрального газопроводу

Результати обчислень сімох розрахункових моделей дозволили чітко простежити закономірність зміщення газопроводу залежно від товщини шару і властивостей ґрунту. Максимальні деформації припадають на ділянки, в яких збільшується напруження і прогин. Крім того, контроль напружено-деформованого стану газопроводу на окремих ділянках конструкції засвідчив, що часткове зняття ґрунту не гарантує повного розвантаження трубопроводу в ґрунтовому масиві.

Дослідження прогину газопроводу дає можливість перейти до моделювання точності геодезичних спостережень за деформаціями і обґрунтувати точність виконання геодезичних робіт.

У четвертому розділі «**Моделювання точності геодезичних спостережень стану магістрального газопроводу на основі визначення його напружено-деформованого стану**» висвітлено точності геодезичних робіт залежно від величини змодельованого гіпотетичного приросту переміщення трубопроводу та відповідної періодичності спостережень.

Розв'язок диференціальних рівнянь містить характеристики напружено-деформованого стану у вигляді:

- приросту моменту

$$\Delta M = EI \cos^2 \varphi \left( -\sin 2\varphi \frac{4f}{l^2} wb - b^2 w \right), \quad (5)$$

де параметр  $b$ , який характеризує частоту повторень косинусоїди, визначають за формулою

$$b = \frac{\pi}{l_s}, \quad (6)$$

де  $l_s$ - відстань між контрольними точками;

- повздовжньої сили:

$$\Delta N = -EF \cos \varphi a b \sin bx, \quad (7)$$

де  $F = \delta D \pi$  – величина поперечного перерізу.

На підставі даних про запас конструктивних властивостей (коефіцієнти надійності та інше), що становить приблизно 20%-30% максимального згинального моменту ( $M_{max}$ ), а також коефіцієнта переходу від величини допустимого переміщення до середньої квадратичної похибки встановлено точність геодезичних вимірів залежно від рівня визначення характеристик напружено-деформованого стану трубопроводу, а саме:

- точність геодезичних робіт у вертикальній площині:

$$m_w = \frac{m_{\Delta M_{max}}}{EI \cos^2 \varphi \left( \sin 2\varphi \frac{4f \pi}{l^2 l_s} + \frac{\pi^2}{l_s^2} \right)}; \quad (8)$$

- точність геодезичних робіт у горизонтальній площині:

$$m_u = \frac{m_{\Delta N_{max}} l_s}{EF \cos \varphi}. \quad (9)$$

Для виконання розрахунку та диференціації точності геодезичних спостережень для всіх змодельованих варіантів розміщення газопроводу в ґрунті як вихідні дані були взяті прирости моменту і нормальної сили, площа поперечного перерізу і величина жорсткості трубопроводу (табл. 1).

Точність геодезичних робіт у вертикальній площині

Розрахункова модель	Прогин, мм	Довжина ділянки 50 м
		$m_w$ , мм
2-га - западини в ґрунті	11,6	0,36
3-тя - ґрунтовий насип	33,0	0,72
4-та - мульда замочування	15,5	0,38
5-та - має кут нахилу+1-ша модель	10,2	0,20
6-та - має кут нахилу+2-га модель	20,2	0,58
7-та - обвал	84,6	0,96

З результатів обчислень випливає: якщо параметри ґрунтової основи недостатньо досліджені чи змінюються з часом, то змодельоване значення гіпотетичного переміщення варіюється в межах  $85\text{мм} \pm 10\text{мм}$  (внаслідок зменшення чи збільшення модуля деформації). Показано, що точність вимірювання вертикальних зміщень має бути вдвічі вищою ніж горизонтальних, зокрема на стрімких зсувах потрібно брати до уваги кут нахилу основи зсуву до горизонту.

Удосконалено розрахунок періодичності геодезичних спостережень за деформаціями газопроводу. Як математична модель була використана експоненціальна залежність

$$w_t = w \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t}), \quad (10)$$

де  $w$  – величина кінцевих прогинів;  $\alpha$  – емпіричний коефіцієнт, визначуваний залежно від характеристик ґрунту за формулою

$$\alpha = 0,75 \cdot 10^8 \cdot \frac{k(1 + \varepsilon_0)}{a\gamma_B h}, \quad (11)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрації ґрунту;  $a$  – коефіцієнт щільності залежно від коефіцієнта приросту  $\varepsilon_0$ ;  $\gamma_B = 0,001$  – вага  $1\text{см}^3$  води, кг;  $h$  – товщина шару ґрунту.

У такому разі тимчасові характеристики, тобто періоди пов'язані з величиною кінцевого прогину та характеристиками ґрунту (рис. 4).

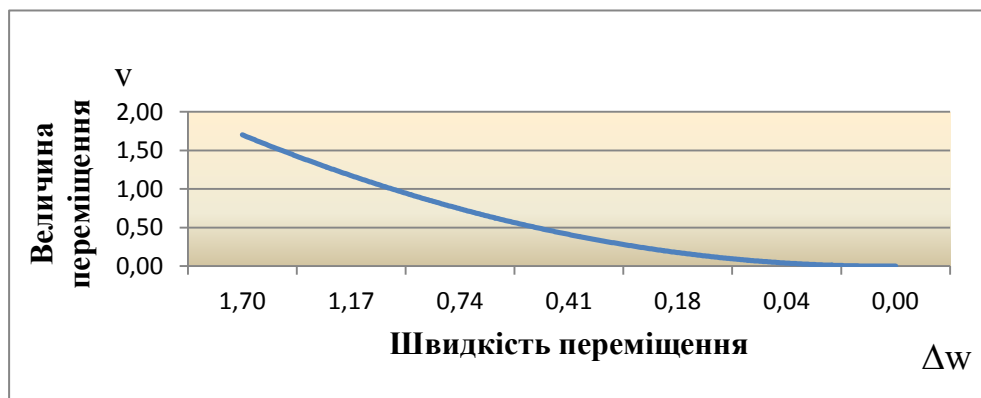


Рис. 4. Крива стабілізації переміщень в часі (для 2-ї математичної моделі)

Такий підхід дає змогу виявити, спростувати чи підтвердити характер впливу геологічних чинників на результати чисельного моделювання, на підставі яких виконують розрахунок точності виконання геодезичних робіт для виявлення деформацій газопроводів та запобігання їх виникненню. При цьому взято до уваги

напружено-деформований стан досліджуваної системи, а саме «трубопровід – ґрунтова основа», що дає можливість обґрунтовано виявляти та уточнювати моделі системи.

У п'ятому розділі «**Моделювання точності геодезичних спостережень стану магістрального газопроводу на основі визначення його напружено-деформованого стану**» розглянуто застосування теорії і методів, викладених у попередніх розділах, для розрахунку точності та вдосконалення технології геодезичних робіт під час проведення моніторингу магістральних газопроводів.

Апробація теоретичних розробок була виконана нами на прикладі частини магістрального газопроводу, відповідно до сьомої моделі (розділ 2), тобто коли частина газопроводу заходиться у ґрунті, а частина виходить на поверхню як балковий надземний перехід.

Запропоновано структурну схему системи геодезичного моніторингу ділянок газопроводу з розвитком зсувних процесів (рис. 5).

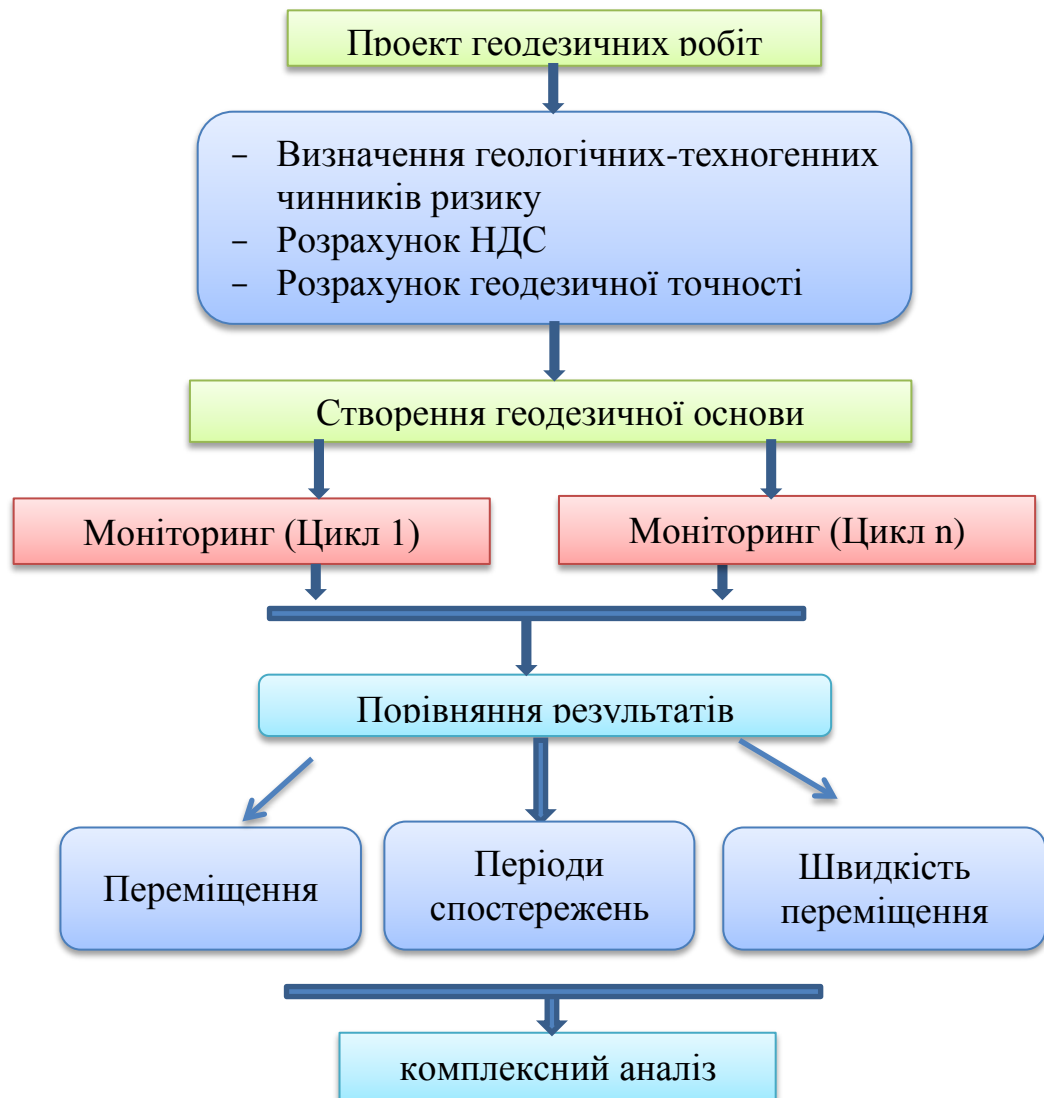


Рис. 5. Структурна схема системи моніторингу ділянок газопроводу

Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану надземного балкового переходу було виконане нами у двох варіантах: перша модель — з

граничною умовою жорстко заземлених кінців балки; друга модель — шарнірне обпирання переходу. Для цих двох моделей за розробленою методикою виконано розрахунок достатньої точності геодезичних спостережень.

Виконано аналіз даних попередніх циклів спостережень. За результатами їх порівняння (рис. 6) доходимо висновку, що газопровід характеризується стабільною роботою. Таким чином, підтверджено його готовність і здатність до функціонування в штатному режимі, а також ефективність впровадження технології геодезичного моніторингу.

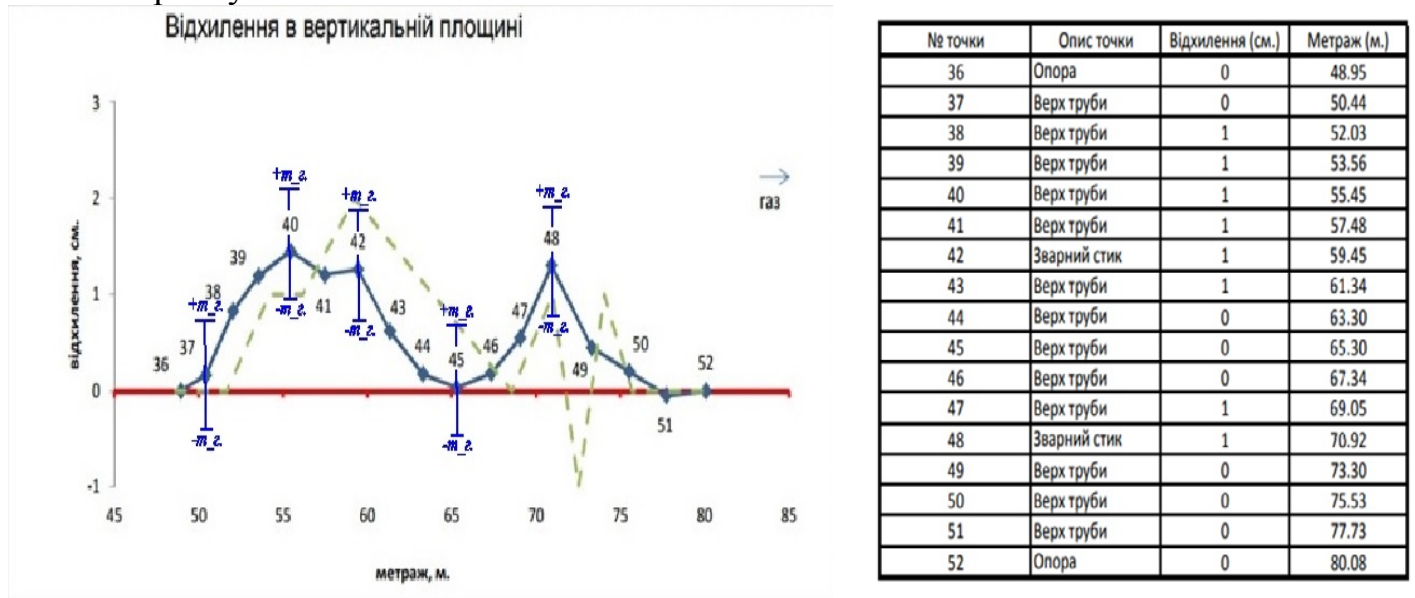


Рис. 6. Порівняння циклів спостережень у вертикальній площині

Отже, експериментально доведено, що впровадження такого підходу до геодезичного моніторингу надземного балкового переходу газопроводу дає змогу знизити матеріальні витрати на виконання періодичних спостережень та своєчасно отримувати інформацію про стан газопроводу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та викладено практичні результати розв'язання науково-прикладної задачі з моделювання точності геодезичних робіт в процесі проведення моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкції і ґрунтової основи.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи:

1. Проаналізовано моделі та сучасні методи геодезичного моніторингу за переміщеннями магістральних газопроводів. Встановлено, що важливою частиною геодезичного моніторингу є система комплексного прогнозування небезпечного розвитку деформаційних геологічних процесів та їх вплив на інженерні об'єкти.

2. Розвинуто концепцію інтегрального оцінювання впливу геологічних чинників на надійність функціонування магістрального газопроводу та складено класифікацію впливів геологічного середовища на магістральний газопровід. Запропоновано алгоритм розподілу впливів геологічних і техногенних чинників

ризика на магістральний газопровід і визначено ділянки, що характеризуються найвищим ступенем небезпеки.

3. Обґрунтовано інноваційну доцільність диференціації точності результатів геодезичних спостережень у визначенні рухів земної поверхні, спричинених геологічними і техногенними факторами, що дає змогу встановити найбільш небезпечні ділянки газопроводу.

4. Розроблено розрахункову та математичну моделі, що дало змогу запропонувати ефективний метод розв'язання системи складних диференціальних рівнянь з граничними умовами будь-якого виду для подальшого переходу від характеристик напружено-деформованого стану газопроводу до визначення точності геодезичних спостережень. Розроблений математичний метод має переваги перед іншими методами за простою та оперативністю застосування та дає можливість розв'язувати проблеми виявлення порушень на трасах трубопроводів.

5. Удосконалено методику моделювання геодезичної точності спостережень за переміщеннями газопроводу на досліджуваних ділянках. Запропоновано метод визначення періодів спостережень за переміщенням ґрунтової основи та магістрального газопроводу.

6. Виконано апробацію за розробленим методом визначення напружено-деформованого стану газопроводу та алгоритмом визначення точності геодезичного моніторингу на прикладі надземного балкового переходу магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород».

7. Подальші дослідження слід розвинути в напрямі підвищення точності геодезичних робіт в горизонтальній площині, застосуванні сучасних геодезичних технологій, а саме радарної інтерферометрії і GNSS, та в удосконаленні методів оброблення моделей прогнозування переміщення.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у наукових фахових виданнях України**

1. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Порядок визначення напружено-деформованого стану лінійних споруд в ґрунтовій основі. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2011. Вип. 43. С. 516-527.

2. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Загальний підхід до моделювання напружено-деформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної точності вимірювання. *Інженерна геодезія*. Київ. 2016, Вип. 63. С. 14-19.

3. Староверов В. С., Нікітенко К. О. Методики та нормативні вимоги картографування для моніторингу магістральних трубопроводів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ. 2012, Вип. 46. С. 549 - 556.

4. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Розрахунок точності інженерно-геодезичних робіт при визначенні напружено-деформованого стану магістральних газопроводів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2013. Вип. 47. С. 661 - 666.

5. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Оцінка напружено-деформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної

точності вимірювання. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2013. Вип. 50. С. 731-737.

6. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Дослідження точності геодезичних спостережень стану магістрального газопроводу на основі визначення напружено-деформованого стану при спільних деформаціях розтягу – стиснення та прогину його осі. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2014. Вип. 51. С. 688-698.

7. Нікітенко К. О. Методологія переходу від інтегральної оцінки НДС газопроводу до визначення точності геодезичних робіт. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2015. Вип. 55. С. 284-289.

8. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Геодезичний моніторинг напружено-деформованого стану магістральних газопроводів з огляду на опір навколишнього ґрунту. *Інженерна геодезія*. Київ, 2014. Вип.61. С. 48-57.

9. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Загальний підхід до моделювання напружено-деформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної точності вимірювання. *Інженерна геодезія*. Київ, 2016. Вип.63. С. 14-20.

10. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Застосування методів дистанційного контролю для моніторингу магістральних нафтопроводів і газопроводів. *Містобудування та територіальне планування*: Київ, 2017. Вип. 63. С. 475-478.

11. Староверов В. С., Нікітенко К. О. Оцінка точності дистанційної діагностики трубопроводу із застосуванням БПЛА серії SUPERCAM. *Інженерна геодезія*. Київ, 2018. Вип. 65. С. 25-32.

12. Староверов В. С., Нікітенко К. О. Розрахунок параметрів аерофотозйомки при паспортизації магістральних трубопроводів. *Інженерна геодезія*. Київ, 2019. Вип. 66. С. 45-51.

13. Нікітенко К. О. Сучасні методи моніторингу технічного стану газопровідних систем. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2019. Вип.67. С. 321-332.

14. Староверов В. С., Нікітенко К. О. Розрахунок параметрів тепловізійної аерофотозйомки при визначенні просторового положення труби магістрального газопроводу. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2019. Вип. 69. С.392-398.

15. Мазницький А. С., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Обґрунтування точності геодезичних спостережень при проведенні моніторингу стану магістральних газопроводів. *Інженерна геодезія*. Київ, 2019. Вип.67. С. 45-51.

16. Мазницький А. С., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Інтегральна оцінка впливу геологічних чинників щодо надійності функціонування магістрального газопроводу. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2019. Вип. 70. С. 366-370.

**Статті у закордонних наукових виданнях, що індексуються в наукометричних базах Web of Science та SCOPUS**



17. Чиби́ряков В. К., Староверов В. С., Никитенко К. А. Комплексный подход к определению геодезическими методами напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода. *Геодезия и аэрофотосъемка*. Москва, 2014. Вып. 5. С. 18-22. (Web of Science).

18. Roman Shults, Annenkov Andriy, Aukazhiyeva Zhanar, Soltabayeva Saule , Seitkazina Gulnur, Khailak Andriy, Nikitenko Kira , Sossa Bohdan , and Kulichenko Natalia. The Features of Data Simulation for Pipeline Overpasses Monitoring by Terrestrial Laser Scanning and Total Station Measurements. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Switzerland, 2021. (SCOPUS, Q3).

### **Статті в інших наукових виданнях**

19. Мазницький А. С., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Верифікація геологічних та техногенних чинників ризику під час експлуатації магістральних трубопроводів. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2019. Вип.6. С. 22-30.

### **Статті у збірниках праць за матеріалами конференцій**

20. Міжнародна наукова-практична конференція «Сучасна землевпорядна наука: сьогодення та перспективи розвитку» (11-12 березня 2020 року, Білоцерківський національний аграрний університет) за таким напрямом: 1. Моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу. 2. Інноваційна диференціація точності результатів геодезичних спостережень на аварійно небезпечних ділянках магістрального газопроводів;

21. Міжнародний форум ГОСТРОЙ – 2020 «Моделирование точности геодезических наблюдений при проведении мониторинга состояния магистральных газопроводов» (29 березня 2020р., м. Новосибірськ).

### **Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації**

22. Чиби́ряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Геодезичний моніторинг зсувних ділянок магістральних трубопроводів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2012. Вип. 46. С. 625-630.

## **АНОТАЦІЯ**

**Нікітенко К. О. Моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу на стадії експлуатації магістрального газопроводу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія і картографія. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2021.

У дисертації викладено авторській підхід до розв’язання науково-прикладної задачі з удосконалення методів визначення точності геодезичних робіт під час

експлуатації магістральних газопроводів. Розроблено концептуальний підхід до визначення точності геодезичних робіт при експлуатації магістральних газопроводів шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкцій. Виконано оцінювання ділянок підвищеної небезпеки на магістральному газопроводі. Запропоновано розрахункові моделі, які дають змогу визначати допустимі переміщення трубопроводу в ґрунтовій основі. На підставі аналізу запропонованих розрахункових моделей розміщення газопроводу в ґрунтовій основі розроблено методику визначення точності геодезичних робіт у вертикальній і горизонтальній площинах. Запропоновано методику визначення періодів спостережень за переміщенням ґрунтової основи магістрального газопроводу.

Рекомендовано до застосування методику визначення напружено-деформованого стану газопроводу й алгоритм визначення точності геодезичних робіт, що була апробована під час геодезичного моніторингу на газопроводі «Уренгой – Помари – Ужгород».

**Ключові слова:** ризик, газопровід, напружено-деформований стан, магістральний газопровід, геодезичні роботи, геодезична точність, інженерно-геодезична техніка.

## АННОТАЦІЯ

**Никитенко К. А. Моделирование точности геодезических работ при проведении мониторинга на стадии эксплуатации магистрального газопровода.**  
– *Квалификационный научный труд на правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - Геодезия, фотограмметрия и картография. - Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2021.

В диссертации изложен авторский подход к решению научно-прикладной задачи по совершенствованию методов определения точности геодезических работ при эксплуатации магистральных газопроводов. Разработан концептуальный подход к определению точности геодезических работ при эксплуатации магистральных газопроводов путем моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции. Выполнена оценка участков повышенной опасности на магистральном газопроводе. Предложены расчетные модели, которые позволяют определить допустимые перемещения трубопровода в ґрунтовой основе. На основе анализа предложенных расчетных моделей размещения газопровода в ґрунтовой основе разработана методика определения точности геодезических работ в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предложена методика контроля определения периодов наблюдений за перемещением ґрунтового основания и магистрального газопровода.

Предложенная методика определения напряженно-деформированного состояния газопровода и алгоритм определения геодезических работ была апробирована на газопроводе «Уренгой — Помары — Ужгород» и определена точность геодезических наблюдений.

**Ключевые слова:** риск, газопровод, напряженно-деформированное состояние, магистральный газопровод, геодезические работы, геодезическая точность, инженерно-геодезическая техника.

## ANNOTATION

**Nikitenko K.O. Modeling of accuracy of geodetic works at carrying out of monitoring at a stage of operation of the main gas pipeline.** – *Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.*

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.24.01 - Geodesy, photogrammetry and cartography. - Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021

The dissertation presents the author's approach to solving the scientific and applied problem of improving the methods of determining the accuracy of geodetic works in the operation of main gas pipelines. A conceptual approach to determine the accuracy of geodetic works in the operation of main gas pipelines by modeling the stress-strain state of structures. The assessment of high-risk areas on the main gas pipeline has been performed.

The joint work of the pipeline with the soil base is modeled, and the basic methods and theoretical bases of modeling the stress-strain state of the soil bases are determined, as well as the theory of the development of the soil base and pipeline movement in time. The results of the calculations made it possible to clearly trace the regularity of the gas pipeline displacement with the change of the layer and soil properties. Maximum deformations occur in areas where stress and deflection increase. Also, the control of the stress-strain state of the gas pipeline section at certain stages of construction showed that the partial removal of soil does not provide complete unloading of the pipeline in the soil mass.

The assessment of high-risk areas on the main gas pipeline has been performed - which is the main preparatory step to the calculation of environmental risk indicators and determination of the parameters of the stress-strain state of the main gas pipeline. This makes it possible to identify potentially dangerous sections of the main gas pipeline for technical and organizational measures to ensure accidents during the operation of the main gas pipeline.

A method for comprehensive assessment of geological risk factors has been developed, which is the basis for determining the stress-strain state of the pipeline, which requires a differentiated approach to establishing the accuracy of geodetic works for each section of the pipeline and allows to approximate the probability of geological hazards on the pipeline.

A computational and mathematical model was developed, which made it possible to develop an effective method for solving a system of complex differential equations of any kind by boundary conditions to obtain the results of calculations of the characteristics of the stress-strain state of the pipeline. The developed method has advantages over other methods of determining the stress-strain state of gas pipelines in terms of simplicity and efficiency of application and allows to solve traditional issues of detecting violations on pipeline routes.

The technique is based on the transition from the stress-strain state to the accuracy of geodetic observations. The calculation of the periodicity of geodetic observations of gas pipeline deformations has been improved. The distance that should be between the marks is substantiated, so that the results of geodetic observations could be used to analyze the static condition of the pipeline with appropriate accuracy, and the frequency of geodetic works.

This approach allows to identify, refute or confirm the nature of the influence of geological factors on the results of numerical modeling, which is used to calculate the accuracy of geodetic works, in relation to the detection and prevention of deformations of gas pipelines. This takes into account the stress-strain state of the studied system, namely the system "pipeline - soil base", which allows you to reasonably identify and refine models of the system.

In the event of an emergency, the system allows you to predict the consequences, make management decisions, thereby reducing response time and reduce damage from possible emergencies. The structural scheme of the system of geodetic monitoring of gas pipeline sections with the development of landslide processes is developed.

The performed approbation of theoretical developments of the beam overpass allowed to reduce the material costs for periodic monitoring and to ensure timely receipt of information on the condition of the overpass of the gas pipeline.

Modern practice of engineering and geodetic observations of deformation processes requires the detection of minimal absolute displacements, which increases the requirements for accuracy of measurements, and the practical implementation of accurate regime observations using the latest automated engineering and geodetic equipment (satellite navigation systems, unmanned aerial vehicles and unmanned aerial vehicles). and computer technologies for operational processing of measurement results, geodetic monitoring, preparation of information and engineering solutions. It is these issues related to the study and implementation of advanced technologies, became the subject of the dissertation.

**Key words:** risk, gas pipeline, stress-strain state, main gas pipeline, geodetic works, geodetic accuracy, engineering-geodetic equipment.