

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

На правах рукопису

Кухтар Денис Васильович

УДК 528.48

**ГЕОДЕЗИЧНИЙ КОНТРОЛЬ
НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ ТАХЕОМЕТРІВ У
БЕЗРЕФЛЕКТОРНОМУ РЕЖИМІ ВИМІРЮВАНЬ**

05.24.01 – *Геодезія, фотограмметрія та картографія*

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
кандидат технічних наук,
доцент **Ільків Є. Ю.**

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



Івано-Франківськ – 2016

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Аналіз сучасного стану геодезичного контролю надземних переходів магістральних газопроводів	10
1.1. Контроль за станом надземних переходів газопроводів як спосіб підвищення їх ефективної експлуатації.....	11
1.1.1. Причини порушень роботи надземних переходів трубопроводів Західно-Українського регіону.....	11
1.1.2. Склад робіт з обстеження надземних переходів газопроводів.....	13
1.2. Аналіз нормативної бази для геодезичного контролю надземних переходів газопроводів.....	17
1.3. Сучасний стан геодезичного контролю лінійних споруд.....	24
1.4. Огляд сучасних геодезичних приладів та засобів для моніторингу трубопровідних систем.....	26
1.5. Висновки до розділу 1. Формулювання задачі дослідження.....	30
2. Обґрунтування точності спостережень за зміщеннями надземних переходів газопроводів.....	32
2.1. Точність геодезичних робіт для спостереження за осіданнями опор надземних трубопроводів.....	33
2.1.1. Визначення допустимої величини осідання опори надземного трубопроводу.....	33
2.1.2. Точність геодезичних спостережень за вертикальними зміщеннями опор, як детермінована величина.....	37
2.2. Оцінка впливу короткоперіодичних горизонтальних зміщень надземних газопроводів на точність геодезичних спостережень.....	41
2.2.1. Дослідження добових температурних переміщень надземних переходів газопроводів.....	42
2.2.2. Кореляційний аналіз температурних переміщень надземних трубопроводів.....	50

2.2.3 Динамічна модель процесу горизонтальних переміщень надземного трубопроводу.....	57
2.2.3.1 Побудова динамічної моделі.....	57
2.2.3.2 Вплив високочастотних коливань на точність визначення горизонтальних переміщень трубопроводу.....	59
2.3 Висновки до розділу 2.....	61
3. Розроблення методики геодезичного контролю за станом надземних переходів газопроводів.....	62
3.1. Геодезична основа для моніторингу просторового положення надземних переходів газопроводів.....	63
3.1.1. Проектування вихідної планово-висотної основи.....	63
3.1.2. Особливості виду деформаційних марок для спостереження за зміщеннями надземних переходів газопроводів.....	68
3.1.3. Дослідження точності вимірювання віддалей до плівкових відбивачів.....	77
3.2. Визначення просторового положення надземних газопроводів з використанням безрефлекторного режиму електронного тахеометра.....	81
3.2.1. Визначення граничного кута падіння лазерного променя у безрефлекторному режимі.....	81
3.2.2. Оцінка точності результатів вимірів в безрефлекторному режимі.....	86
3.2.3. Дослідження точності безрефлекторного режиму електронного тахеометра.....	93
3.2.4. Аналітичне представлення результатів похибки вимірювання віддалі в безрефлекторному режимі тахеометра.....	96
3.3. Організація і техніка геодезичних спостережень за зміщеннями та осіданням надземних газопроводів.....	102
3.3.1. Оптимізація розташування станції електронного тахеометра для спостереження за зміщеннями осі трубопроводу.....	102
3.3.2. Методика вимірювань планового зміщення осі надземного трубопроводу із застосуванням електронних тахеометрів.....	107

3.3.3. Методика вимірювань вертикальних зміщень опор та осі надземного трубопроводу тригонометричним нівелюванням.....	111
3.3.4. Методика розрахунку прогину осі надземного трубопроводу.....	114
3.3.5. Використання функції “визначення недоступної віддалі” електронного тахеометра для визначення зміни крену опор надземних трубопроводів....	116
3.4. Висновки до розділу 3.....	118
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120
ДОДАТОК А	

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з найважливіших науково-технічних проблем XXI століття є проблема оцінки технічного стану і продовження ресурсу безпечної експлуатації потенційно небезпечних об'єктів. До їхнього числа відносять магістральні газопроводи, основна частина яких відпрацювала 50-75% проектного ресурсу. Утримання системи магістральних газопроводів у справному, надійному та безпечному стані – складна задача, враховуючи велику кількість факторів. Серед них варто зазначити: значну протяжність, віддаленість від великих населених пунктів, експлуатацію в складних геокліматичних умовах, великі діаметри і робочі тиски.

Фізико-географічні умови Карпатського регіону, у межах якого розташована густа мережа магістральних газопроводів, довжиною понад 1500 км, зумовили необхідність будівництва великої кількості надземних переходів через яри, водотоки та інші перешкоди. На сьогоднішній день одне тільки УМГ “Прикарпаттрансгаз” експлуатує понад 352 надземних переходи, загальною протяжністю 34 км. Від надійної роботи газопроводу на ділянках надземних переходів залежить ефективна експлуатація лінійної частини трубопроводних магістралей.

Згідно з “Правилами технічної експлуатації магістральних газопроводів”, до комплексу обстежень надземних переходів входять геодезичні роботи, які передбачають визначення просторового положення трубопроводу. При цьому, основними приладами, які до цього часу використовують для виконання геодезичних робіт, є оптико-механічні прилади, нівелірні рейки, прилади для побудови створів, електронні тахеометри і цифрові нівеліри. Застосування цих приладів вимагає переміщення працівників вздовж трубопроводу, що часто є дуже небезпечним. Тому розроблення нових методів вимірювань, з використанням сучасних геодезичних приладів для технічного діагностування надземних трубопроводів, є технологічно виправданим, оскільки це надасть змогу

скоротити обсяги робіт, автоматизувати процес збору даних та підвищити рівень безпеки працівників.

Вагомий внесок до питання надійної експлуатації трубопроводів у складних умовах зробили: Молдованов О. І., Олійник А. П., Перун Й. В., Субботін І. Е., Тихонова І. А., Хігер М. Ш., Шевердін П. Г., Шлапак Л. С. та інші.

Проблемі геодезичного забезпечення моніторингу та оцінки технічного стану складних інженерних об'єктів присвячені роботи таких вчених: Барана П. І., Брайта П. І., Бурака К. О., Відуєва М. Г., Войтенка С. П., Ганьшина В. Н., Жукова Б. Н., Ключина Є. Б., Міхелева В. Д., Перовича Л. М., Піскунова М. Е., Староверова С. В., Самойленка О. М., Третяка К. Р., Чибірякова В. К., Черняги П. Г., Шульца Р. В., а також закордонних вчених: Gassner G., Nematollah H., Alba M., Ruland R.

Дослідженнями безрефлекторного режиму електронних тахеометрів займалися такі вітчизняні та закордонні вчені: Ламбін В. М., Назаров І. О., Тарасенко М. І., Ashraf A. Beshr, Gairns C.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках державних, галузевих і науково-дослідних програм на підставі таких документів: “Оновлена енергетична стратегія України на період до 2030 р.”; Закон України “Про трубопровідний транспорт” N192/96-ВР від 15.05.2006 р.; Постанова НАК “Нафтогаз України” “Про посилення контролю за роботою газопроводів і споруджень, розташованих на них”, № 45 від 23.05.2010 р.

Роботи автора відповідають науковому напрямку держбюджетної тематики кафедри землевпорядкування та кадастру Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: “Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняної нафти і газу, їх транспортування та диверсифікації постачання для підвищення енергетичної безпеки України” (№ 0115U007099). Основні положення дисертаційної роботи були використані для виконання госпдоговірної науково-дослідної роботи:

“Комплекс робіт з інженерно-геодезичних вишукувань надземних переходів магістральних газопроводів через водні перешкоди по філії УМГ “Прикарпаттрансгаз” у Долинському ЛВУМГ”, договір №123/2015 від 16.09.2015 р.

Мета і задачі дослідження. *Метою* роботи є науково-технологічне обґрунтування геодезичного контролю надземних переходів магістральних газопроводів з використанням електронних тахеометрів у безрефлекторному режимі вимірювань для забезпечення їхньої експлуатаційної надійності.

Задачі досліджень:

- виконати аналіз існуючих методів і засобів геодезичного контролю за станом надземних переходів магістральних газопроводів;
- розробити технологію геодезичного контролю, для забезпечення експлуатаційної надійності надземних переходів, з використанням електронних тахеометрів у безрефлекторному режимі вимірювань;
- обґрунтувати точність спостережень за зміщеннями надземних переходів газопроводів;
- дослідити вплив теплових факторів на зміщення надземних переходів трубопроводів;
- розробити засоби для підвищення точності геодезичних спостережень під час обстеження надземних переходів трубопроводів.

Об'єктом дослідження є надземні переходи магістральних газопроводів.

Предметом дослідження є геодезичний контроль просторових переміщень надземних переходів газопроводів та їхніх опор.

Методи дослідження, використані у дисертації, забезпечують вирішення основних задач досліджень. Для обґрунтування точності геодезичних спостережень за зміщеннями надземних трубопроводів та їхніх опор використано методи розрахунку граничного стану міцності матеріалу трубопроводу; методи математичної статистики, зокрема: метод кореляційного аналізу та метод послідовних різниць (критерій Аббе) – для аналізу температурних переміщень трубопроводу; метод найменших

квадратів – для моделювання параметрів аналітичної моделі, створеної за результатами дослідження точності безрефлекторного режиму електронного тахеометра.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено технологію застосування електронних тахеометрів у безрефлекторному режимі для контролю положення надземних переходів газопроводів.

2. Обґрунтована точність спостережень за осіданням опор у залежності від фактичного положення осі трубопроводу.

3. Змодельовані короткоперіодичні зміщення надземних газопроводів та встановлено величину впливу добових температурних переміщень на точність геодезичних вимірів.

4. Підтверджена ефективність застосування візирної марки у формі бісектора, для забезпечення високої точності наведення візирного променя до її поверхні під гострим кутом.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена методика підвищення точності та безпеки виконання геодезичних робіт під час визначення геометричних параметрів надземних переходів трубопроводів, в залежності від їхньої конструкції та умов експлуатації;
- підвищена точність наведення візирного променя на поверхню трубопроводу під гострим кутом за рахунок використання запропонованої візирної марки;
- розроблені рекомендації щодо проведення геодезичного контролю, які допоможуть уникнути впливу короткоперіодичних зміщень труби, викликаних факторами термічного впливу.

Результати розробок, отримані в дисертаційній роботі, рекомендовані для застосування на практиці лінійно-експлуатаційним службам підприємств, які обслуговують магістральні газопроводи, та були успішно використані

фахівцями філії УМГ “Харківтрансгаз” ПАТ “Укртрансгаз” під час проведення контролю технічного стану надземних переходів газопроводів.

Особистий внесок здобувача. Результати досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: розроблення методики дослідження безрефлекторного режиму вимірювань електронним тахеометром [3, 10]; обґрунтування точності геодезичних робіт для визначення осідань опор надземних трубопроводів [1, 6]; запропонована форма деформаційної марки [5]; розроблення методики дослідження добових температурних зміщень надземних трубопроводів, аналіз отриманих даних [4, 8].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній конференції “Безпека об’єктів нафтогазового комплексу” (м. Івано-Франківськ, 2011 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи транспортування нафти і газу” (м. Івано-Франківськ, 2012 р.), Міжнародному науково-технічному симпозиумі “Геоінформаційний моніторинг. GPS і ГІС технології” (АР Крим, м. Алушта, 2012 р.), Міжнародній науково-практичній конференції “Геофорум” (м. Львів, 2013 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 друкованих праць, у тому числі 6 статей у фахових наукових виданнях, визнаних ВАК України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав (Росія, м. Москва) і 4 – у збірниках матеріалів конференцій.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Спостереження за деформаціями і зміщеннями споруд займають значне місце в сучасній практиці інженерно-геодезичних робіт. Досить сказати, що жодне будівництво великих споруд не обходиться без деформаційного контролю. А для споруд, де від величини деформацій залежить їх стійкість і особливо нормальний режим технологічного процесу, спостереження, розпочаті в період будівництва, продовжуються впродовж усього періоду експлуатації. При цьому обсяг і складність спостережень, а також вимоги до точності їх виконання зростають з року в рік.

До таких об'єктів, що вимагають постійного контролю і обстежень, відносяться магістральні газопроводи. Питанням забезпечення експлуатаційної надійності трубопровідних систем присвячені роботи [31, 76, 82, 88, 113]. Проблематика контролю деформацій газопроводів геодезичними методами описана в працях [6, 77, 87, 120, 126]. Актуальним залишається вдосконалення методик оцінки технічного стану трубопроводів [45, 142, 145].

Широке застосування під час спорудження лінійної частини магістрального газопроводу через природні та штучні перешкоди знайшли надземні переходи у вигляді самокомпенсуючих багатопрогінних балкових систем [89]. Цьому сприяли роботи проектних інститутів Укргіпрогаз, Гіпроспецгаз, ЮЖНІгіпрогаз, Союзгазпроект та інших, а також роботи, виконані лабораторіями ВНІСТА та ВНІГазу.

Дослідженням переходів магістральних газопроводів присвячені роботи, в яких розглянуті питання їх класифікації та вдосконалення методик розрахунку [1, 123], оцінки технічного стану після тривалої експлуатації [106, 112], контролю напружено-деформованого стану трубопроводу при зміні його просторового положення [42, 47, 124], розрахунку на температурні впливи [8, 12], динамічних збурень, викликаних природно-кліматичними

умовами [101, 132, 149], дослідження поздовжньо-поперечного згину та інші технологічні питання.

Роботи з обстеження надземних переходів магістральних газопроводів проводяться для контролю технічного стану переходу в цілому, його окремих ділянок, вузлів та елементів, а також для вивчення роботи споруди та її взаємодію з навколишнім середовищем [114].

1.1. Контроль за станом надземних переходів газопроводів як спосіб підвищення їх ефективної експлуатації

1.1.1. Причини порушень роботи надземних переходів трубопроводів Західно-Українського регіону

Із загальної довжини газопроводів в Україні, понад 20% із них експлуатується в складних умовах Західно-Українського регіону. Серед них такі великі магістральні газопроводи як “Братерство”, “Союз”, “Уренгой – Помари – Ужгород”, “Прогрес”.

Фактори навколишнього середовища, що впливають на трубопроводи як на об’єкт контролю, визначаються зміною температури навколишнього середовища, навантаженнями різного походження, серед яких розрізняють аеродинамічні навантаження [75, 86, 95, 127], квазістаціонарні – обумовлені зміною геокліматичних умов (зсуви ґрунту, зміни русел річок, зміна загальних кліматичних умов) [14, 18], екстремальні навантаження (землетруси, повені, раптові зсуви ґрунту, буревії, технологічні катастрофи та аварії в зоні трубопроводів) [57, 137], помилки під час проектування та спорудження, що зумовлюють зміну конфігурації осі трубопроводів [4, 5], зміни технологічних режимів (вимушені зупинки, пониження тиску, проведення ремонтних та діагностичних робіт). Особливими факторами зовнішнього середовища характеризуються трубопроводи, що експлуатуються в шкідливих з екологічної точки зору умовах (радіація, підвищені концентрації шкідливих речовин), змінні за природним циклом кліматичні фактори.

Пересічений рельєф місцевості, наявність великих природних та штучних перешкод, стислі умови, різкі зміни температури трубопроводу і навколишнього середовища складають фактори, які ускладнюють проектування та експлуатацію газопроводів в цьому регіоні. Це приводить не лише до руйнування, але й утворення дефектів, пов'язаних з порушенням суцільності матеріалу. Дефекти трубопроводів, що зумовлюють їх подальшу відмову, за своїм походженням можуть бути поділені на три групи:

- технологічні дефекти (виникають в процесі виготовлення труб в заводських умовах);
- монтажні дефекти (мають місце при прокладанні та ремонті трубопроводів);
- експлуатаційні дефекти.

Будь-які дефекти, що пов'язані з порушеннями форми конструкції ділянок трубопроводу є концентраторами напружень. Напруження в стінках трубопроводу в місцях різного роду дефектів підвищується в два і більше разів. Це стає основною причиною утворення і розвитку тріщин або прискорених процесів старіння та наступного руйнування металу.

Натурні обстеження стану надземних ділянок газопроводів, прокладених в районі Карпат, показали, що на більшості з них в ході експлуатації виникають значні відхилення в плані від проектного положення, руйнування обвалування входу трубопроводу в ґрунт, опорних частин, а також деформації трубопроводу у вертикальній площині, що негативно впливають на їх експлуатаційну надійність [125] (табл. 1.1).

Як бачимо з табл. 1.1 основними порушеннями, що мають місце під час експлуатації переходів балкового типу є:

- руйнування обвалування;
- поперечне зміщення трубопроводу;
- згин обмежувальних стійок;
- зміщення трубопроводу у висотному положенні;
- розмивання берегових ділянок;
- руйнування опор.

Своєчасне виявлення таких порушень і дефектів сприяє підвищенню безпечної експлуатації та збільшенню ресурсу трубопроводу.

Таблиця 1.1

**Характеристика переходів газонафтопроводів та їх технічний стан
(Західно-Український регіон)**

№	Назва трубопроводу	D, мм	Кількість і % порушень		Типові порушення
			Кількість	% порушень	
1	ДУГ-I	720 1020	7	42	- руйнування обвалування; - поперечне зміщення трубопроводу на опорах.
2	ДУГ-II	1420	12	42	- руйнування обвалування; - значні поперечні переміщення трубопроводу на перших від компенсатора опорах; - згин обмежувальних стійок.
3	«Союз»	1420	20	60	- значні зміщення трубопроводу в плані і з висотою; - згин обмежувальних стійок; - крен опорних башмаків.
4	Уренгой-Помари-Ужгород	1420	10	30	- поперечне зміщення трубопроводу на окремих опорах.
5	«Прогрес»	1420	9	22	- поперечне зміщення на окремих опорах; - розмивання входу трубопроводу в ґрунт.
6	КЗУ-II	1220	14	42	- розмив берегових діляниць; - поперечне зміщення трубопроводу на опорах; - руйнування окремих опор; - згин обмежувальних стійок.
7	Івацевці-Долина	1220	6	31	- поперечне зміщення трубопроводу на окремих опорах; - згин обмежувальних стійок; - руйнування ґрунтового обвалування.
8	«Дружба»	530 720	38	32	- зміщення трубопроводів на опорах; - руйнування ґрунтового обвалування.

1.1.2 Склад робіт з обстеження надземних переходів газопроводів

Головними параметрами, що характеризують здатність трубопровідної системи виконувати завдання із транспортування речовин, є міцність, стійкість, напружений стан та переміщення конструкцій. Всі наведені характеристики можна об'єднати в єдиний показник, який вважається

пріоритетним для оцінки технічного ресурсу конструкцій трубопровідних систем, їх надійності та довговічності – напружено-деформований стан (НДС). Для оцінки НДС надземних переходів газопроводів виконують обстеження технічного стану опор, кріплень, основ фундаментів, місць контактів газопроводу на опорах, металевих та будівельних конструкцій, місць входу і виходу газопроводу із землі, стан захисних пристроїв та загорож, визначення технічного стану берегових ділянок, схилів балок, берегоукріплення, інформаційних знаків, реперів, маркерних пунктів. Обсяг обстежень надземних переходів має проводитися з урахуванням вимог СОУ 60.3-30019801-067:2009 «Магістральні газопроводи. Оцінка фактичного технічного стану потенційно небезпечних ділянок. Методи і методики»:

- стан схилів, наявність розмивів, активізація зсувних процесів (при виявленні негайно інформувати експлуатуючу організацію), тощо. Стан відкосів, їхня стрімкість, товщина настилу, щілини між окремими плитами, міцність дернини;

- стан захисних водовідвідних валиків і перемичок на підходах до переходів;

- наявність відводу дощових, снігових і змішаних стоків (стан нагірних каналів, терас на схилах ярів);

- стан водобійних колодязів, східчастих перепадів та інших гасителів швидкостей потоку;

- справність інформаційних і геодезичних знаків (стан пофарбування, надписів, збереження геодезичного центру, геодезичної піраміди). Наявність, конструкція та місце встановлення реперів, їх відповідність вимогам (обов'язково фотографія) – місця розташування реперів вказує лінійне виробниче управління магістральних газопроводів (ЛВУМГ). Перевірка наявності необхідних загорож з металевої сітки на обох кінцях переходу, наявність попереджувальних та інформаційних знаків;

- стан кріплень трубопроводу до опор (в т.ч. вказати на тип кріплень, для болтового (шпилькового) кріплення перевірити зусилля затягування та

зробити порівняння з проектними або рекомендованими). Стан електроізоляції трубопроводу від опори чи футляру (виявлення контакту “Футляр-Труба”);

- стан берегових, проміжних опор і несучих конструкцій переходу, обстеження стану металевих опорних частин газопроводу на переходах балкового і аркового типу, стану залізобетонних чи металевих опор, їх вертикальності та підмивів фундаменту опор, металевих конструкцій підвісних переходів та берегових анкерних опор, виявлення пошкоджень конструкцій вузлів, деталей у вигляді тріщин, виколів чи випадів бетону, корозійних чи механічних ушкоджень, зміщень, деформацій, руйнувань та інше (у випадку встановлення берегової опори підземно – опору не розкривати);

- визначення технічного стану, стану антикорозійного захисту (візуальна оцінка: наявність ізоляції, товщина ізоляції, адгезія, стан антикорозійного захисту, наявність зовнішньої корозії магістральних газопроводів (МГ)) опор, в т.ч. в русловій частині переходів через ріки та водойми, (обов’язкова фотографія опор);

- для опор в русловій частині переходів через ріки та водойми обов’язково провести водолазне обстеження підводної частини;

- оцінка несучої здатності (розрахунково) опорних конструкцій в разі виявлення відхилення їх від проекту;

- візуальний контроль стану зварних швів і кріплень опорних конструкцій;

- геодезичне тримірне позиціонування надземного газопроводу, опорних конструкцій газопроводу (табл. 1.2). Визначення відхилень розташування газопроводу та опор відносно положення за проектом і відносно останнього обстеження. Визначення прогину труб (фактичного та розрахункового максимально допустимого, опираючись на механічні властивості труби), а також визначення горизонтальних та вертикальних переміщень труби. Місця розташування реперів вказує ЛВУМГ.

Таблиця 1.2

Геодезичні роботи для обстеження надземних переходів газопроводів

Вид робіт	Параметри, що контролюються	Метод контролю	Примітки
Нівелювання переходу, визначення дійсних основних геометричних розмірів переходу	Визначення фактичних відносних позначок положення трубопроводу відносно реперів, визначення величини осідання, зсувів, деформацій, відхилень. Контроль вертикальності опор. Порівняння та зведення на одному аркуші результатів поточного обстеження з результатами мінімум двох попередніх обстежень та результатами позначок згідно з виконавчою документацією. Аналіз виявлених відхилень дійсних положень елементів конструкцій від проектних значень у відповідності з допустимими НТД (СНиП III-42-80) відхиленнями для елементів конструкцій.	Геодезичний контроль положення всіх елементів конструкції переходів. Обмірювання фактичних розмірів конструкцій.	Точки нівелювання погодити з УМГ. Точки нівелювання позначити на трубопроводі постійними знаками для забезпечення наступного контролю в тих же точках. Позначення точок нівелювання оформити двостороннім актом.
Визначення планово-висотного положення трубопроводу	<p>Геодезичні виміри.</p> <p>Топографічна зйомка ділянки виконується в масштабі 1:500, 1:1000 (див. п.5.4.20) геодезичними приладами з точністю, що регламентується нормативними документами. Довжина ділянки обстеження – в межах переходу (довжина надземної частини і ділянки підземної частини по 10м від місця виходу трубопроводу з землі). Смуга шириною 50м (по 25м від осі в кожному сторону), а при наявності деформацій (розмивів, зсувів, просядок тощо) – можливо збільшення меж зйомки, з обов'язковим погодженням із Замовником.</p> <p>На топоплан повинні бути нанесені всі особливості, виявлені під час огляду берегових ділянок.</p>		

Аналізуючи табл. 1.2, бачимо, що при розробці нормативного документу не було приділено достатньої уваги опису геодезичних робіт. Така таблиця з

описом комплексу геодезичних робіт потребує суттєвого доопрацювання. Зокрема тут наведено не повний перелік видів геодезичних робіт. Не зазначено про необхідність контролю за стабільністю вихідної планово-висотної основи; контролю нахилу берегових і руслових опор та ін. Що стосується наведених в таблиці видів робіт, то їх характеристика не дає можливості отримати необхідну інформацію для проведення обстежень, вибору методики та необхідних приладів.

1.2. Аналіз нормативної бази для геодезичного контролю надземних переходів газопроводів

Обстеження надземних переходів магістральних газопроводів виконуються з дотриманням усіх необхідних заходів безпеки, захисту довкілля, та у відповідності до вимог чинних нормативних документів: СОУ 60.3-30019801-050:2008 “Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів”, СТП 320.30019801.069-2003 “Магістральні газопроводи. Типовий регламент технічного обслуговування і ремонту переходів надземних, підземних через автомобільні дороги та залізниці, переїздів через газопроводи”, НПАОП 60.3-1.01-10 “Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів”, СНиП 2.05.06-85 “Магистральные трубопроводы”, ВСН 39-1.10-003-2000. “Положение по техническому обследованию и контролю за состоянием надземных переходов магистральных газопроводов”. Для обстеження висячих, аркових, вантових та інших переходів газопроводу слід використовувати СНиП 3.06.07-86 “Мосты и трубы. Правила обследования и испытаний”. Усі роботи з обстеження надземних переходів виконуються з дотриманням правил охорони праці і техніки безпеки, що викладені в СНиП III-4-86 “Техника безопасности в строительстве”.

Контроль за станом надземних переходів проводиться регулярно (в плановому порядку) з періодичністю, встановленою експлуатуючим підприємством з врахуванням технічного стану переходу, нормативів,

інформації і прогнозів з раніше виконаних обстежень, технологічних режимів експлуатації та природно-кліматичних умов.

Планові обстеження виконуються з допомогою комплексу діагностичної апаратури за програмами і методиками, розробленими експлуатуючим підприємством або спеціалізованими організаціями. В програмах відображені основні задачі і мета робіт, наведені порядок і обсяг робіт з обстеження, вказані параметри для спостереження та вимірювання, технічні засоби, встановлені види і склад звітних технічних документів.

Комплекс геодезичних обстежень надземних переходів магістральних газопроводів включає в себе роботи з визначення просторового положення і переміщення головної осі трубопроводу, висотного положення опор і пілонів, їх нахил у вертикальній площині, а також прогин трубопроводу між опорами. Сьогодні підприємства, які експлуатують магістральні газопроводи, використовують нормативні документи [80, 91], що регламентують порядок і склад геодезичних робіт.

Визначення переміщень надземних газопроводів є складною проблемою. Це зумовлено різноманітністю конструктивних рішень прокладання трубопроводу та значною протяжністю споруди, яка в окремих випадках може досягати 1500 м. Саме тому вибір методу спостережень залежить від вимог до точності, особливостей об'єкту та умов місцевості. Серед класичних геодезичних методів, які застосовують для визначення планово-висотного положення елементів трубопроводу можна виділити такі [122]:

- для визначення висотного положення – геометричне та тригонометричне нівелювання;
- для визначення планового положення – триангуляція, створні виміри, «бокове нівелювання».

Складні умови експлуатації, значна довжина надземних переходів, розміщення трубопроводу на великій висоті над природними та штучними перешкодами створюють певні труднощі у випадку використання вищезазначених методів для встановлення просторового положення

газопроводу. Проаналізуємо методику геодезичних робіт згідно з порядком, встановленим чинними нормативними документами.

Планово-висотна геодезична основа

Систематичні геодезичні спостереження за зміщеннями надземних трубопроводів вимагають створення відповідної геодезичної основи. На великих переходах через природні перешкоди частково зберігаються встановлені під час вишукувань геодезичні центри. Але точність топографо-геодезичних робіт під час виконання інженерних вишукувань недостатня для фіксування зміщень осі трубопроводу. Величину зміщень необхідно визначати з точністю 1-2 см [103]. Таким чином, для забезпечення необхідної точності спостережень за деформаціями створюють локальну планово-висотну геодезичну основу. Для того щоб гарантувати необхідну точність визначення зміщень споруди, виконують контроль за стійкістю планово-висотного положення пунктів геодезичної основи. Однак методи та засоби контролю, регламентовані нормативними документами, потребують удосконалення з огляду на можливості сучасних геодезичних приладів.

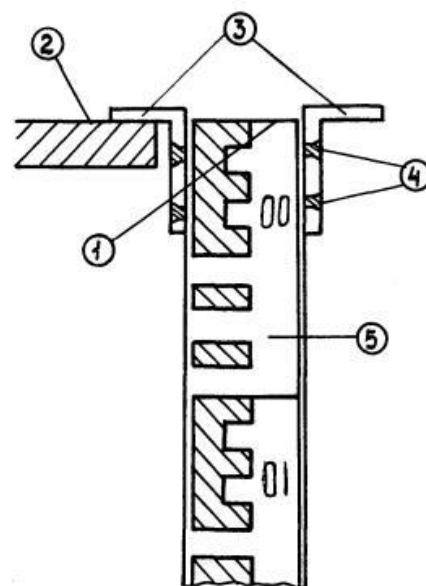
В останні роки при створенні таких мереж широко застосовується супутниковий метод. При цьому GNSS-приймачі можуть також успішно використовуватись для спостережень за стабільністю пунктів вихідної геодезичної основи [99].

Спостереження за вертикальними зміщеннями трубопроводу і опор переходу

Під час обстеження надземних переходів ведуть спостереження за вертикальними зміщеннями опор трубопроводу та пілонів. В залежності від топографічних умов місцевості та конструкції переходу для цього виконують геометричне або тригонометричне нівелювання. Згідно з методикою, описаною в нормативному документі [91], незрозумілим залишається процес нівелювання руслових опор. До того ж під час нівелювання постійно виникає необхідність переміщення працівників з рейкою на трубопроводі.

Враховуючи велику висоту розташування трубопроводу на опорах, це часто дуже небезпечно.

Для нівелювання точок, розташованих вище горизонту приладу, використовують спеціальну рейку (рис. 1.1). Вона складається з нівелірної рейки 5, до якої шурупами 4 прикріплені кронштейни 3. Нижня поверхня кронштейнів повинна збігатися з поверхнею п'ятки рейки 1. За допомогою кронштейну 3 рейку підвішують до поверхні 2.



Методика нівелювання з використанням підвісної рейки ускладнюється, або й взагалі стає неможливою у випадку розташування трубопроводу на високих опорах.

Рис. 1.1 Конструкція рейки для спостереження за осіданнями опор трубопроводу

Сучасні геодезичні прилади дають змогу виконувати безконтактні виміри. Саме ця концепція покладена в основу моніторингу надземних трубопроводів з допомогою електронних тахеометрів (безрефлекторний режим вимірювання) [59, 61] та фототеодолітних комплексів [67].

Для спостереження за зміщеннями труби деформаційні марки закріплюють на катковій опорі, а для спостереження за опорою – на ригелі. Точки на поверхні трубопроводу фіксують нанесенням фарби. В окремих випадках в тілі опори закладають або приварюють деформаційну марку.

Вид деформаційних марок та їх розташування на трубопроводі також є широким і відкритим для дослідження запитанням. Удосконалення методики спостережень із застосуванням електронних геодезичних приладів вимагає особливого підходу до вибору місць закладання деформаційних знаків. В першу чергу такі підходи формуються на основі методики спостережень. Не менш важливо враховувати фактори зовнішнього середовища, які створюють

вплив на результати спостережень (рефракційні поля; азимут сонця відносно візирного променя).

Діючі нормативні документи [80, 91] не розкривають вимог до точності геодезичних робіт для контролю положення елементів надземних трубопроводів, зокрема їх опор. Априорна оцінка точності вимірювань – важливий етап, оскільки від нього залежить вибір методики спостережень і приладів для проведення вимірів.

В більшості літературних джерел розрахунок точності визначення деформацій інженерних споруд виконується через відсутність значення априорної точності у відповідних нормативних документах [117, 130], або необхідність врахування повного навантаження на конструкцію [116]. Особливо актуальним є питання оцінки точності параметрів деформацій, які визначаються сучасними геодезичними приладами за оновленою методикою [2, 17, 110].

Спостереження за горизонтальними зміщеннями опор трубопроводу

Згідно діючих нормативних документів визначення поперечних зміщень (вісь Y) опор виконують методом бокового нівелювання. Для цього закладають два пункти робочої мережі вздовж осі переходу. Віддаль від створу до точок, які підлягають спостереженню не повинна перевищувати 1,2 м [91]. Окрім цього між робочими пунктами повинна бути пряма видимість.

Рельєф місцевості на переходах, а також протяжність самої споруди можуть створювати труднощі для виконання таких умов. Тому застосування даного методу не завжди буде доцільним і реальним з точки зору практичного виконання зі збереженням необхідної точності.

Величину поперечних зміщень опор визначають як значення відхилення бокових граней опор від допоміжного створу в нижньому і верхньому перерізах. Для цього на бокову грань опори встановлюють горизонтальну рейку, довжиною 1,5 м. Знову ж таки методика ускладнюється для високих опор.

Для визначення поздовжніх зміщень опор, на берегах закріплюють робочі пункти I і II, які розташовані на осі X . Для обчислення величини зміщень вимірюють віддалі між робочим пунктом I і насічкою на опорі 1, між насічкою на опорі 1 і 2, 2-3... і т. д., між насічкою на останній опорі і робочим пунктом II. Віддалі вимірюють стальними компарованими рулетками з міліметровими поділками.

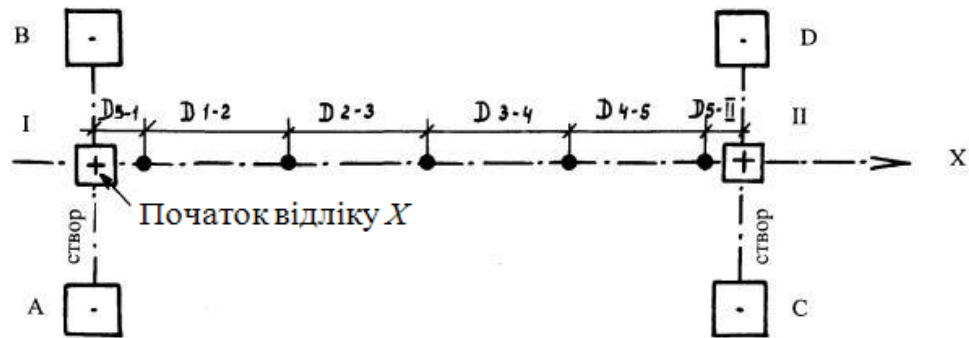


Рис. 1. 2 Схема робочої мережі для визначення поздовжніх зміщень опор

Як бачимо з опису методики, процедура визначення поздовжніх горизонтальних зміщень опор є трудомісткою як на етапі створення вихідної робочої основи, так і на етапі вимірювання віддалей рулеткою.

Визначення нахилу верхнього перерізу опори виконують проектуванням з допомогою теодоліта при двох положеннях вертикального круга. Допускається використання ниткового виска у безвітряну погоду при висоті опори до 3 м. Вимірювання вказаної величини може створювати значні труднощі під час визначення нахилу руслової опори, для якої це особливо актуально.

За відомими значеннями поперечних і поздовжніх зміщень будують графік, а також наносять результуючий вектор зміщень опори. Такий результат отримують після цілого комплексу трудомістких робіт.

Доцільно вдосконалити дану методику, максимально скоротивши обсяг польових робіт. Це стає можливо із застосуванням електронних тахеометрів. Вони зможуть забезпечити непряме визначення результуючого вектора зміщень без необхідності вимірювання віддалі між опорами.

Спостереження за прогинами трубопроводу на переходах

Спостереження за прогинами виконують на переходах через штучні та природні перешкоди і на крутих схилах. Цикли спостережень виконують 1-2 рази в літній період, 1-2 рази в осінньо-зимовий період, також після сильних снігопадів та обмерзань труби. Під час проходження внутрішньотрубних інспекційних снарядів (*пристрої, що переміщуються всередині труби потоком продукту, який перекачується, забезпечують контроль і реєстрацію даних про дефекти і особливості стінки трубопроводу, зварних швів та їх місця розташування*) ведуть безперервні спостереження.

Для виявлення прогинів на досліджуваній ділянці прокладають нівелірний хід між опорними реперами. Під час виконання технічного нівелювання визначають висоти опорних поверхонь трубопроводу, точок на нижній поверхні труби в середині прогону і двох точок за 3-5 м від опор. Для визначення висот точок на нижній поверхні труби нівелірну рейку встановлюють п'яткою вгору, а відлік записують зі знаком “-” [91].

Актуальність даних спостережень вимагає вдосконалення методики для максимального скорочення часу спостережень. Розташування трубопроводу на високих опорах не дасть змоги встановити нівелірну рейку до нижньої поверхні труби. Виникатимуть труднощі і під час визначення висоти в прогоні над водною поверхнею.

Огляд діючої нормативної літератури вказав на необхідність удосконалення описаних методик. Застосування сучасних геодезичних приладів дасть змогу скоротити обсяги польових робіт та час на їх виконання.

Не менш важливим під час вибору приладів та методів для проведення геодезичного контролю є вимоги до точності. Відсутність будь-яких вимог в нормативних документах вимагає розроблення принципів обґрунтування точності спостережень.

1.3 Сучасний стан геодезичного контролю лінійних споруд

Традиційно моніторинг стану споруд виконується із застосуванням різноманітних геодезичних засобів: оптичні нівеліри (визначення вертикальних осідань); електронні тахеометри (визначення горизонтальних і вертикальних зміщень); супутникові приймачі (визначення горизонтальних і вертикальних зміщень); далекоміри (визначення горизонтальних зміщень); давачі нахилу, акселерометри, тензометри. Вибір типу приладів виконується у відповідності до особливостей споруди, її розмірів і умов спостережень.

Для геодезичного контролю лінійних споруд широкого застосування набули оптичні прилади, а також електронні тахеометри та цифрові нівеліри [78, 144, 146]. В залежності від умов спостережень, необхідної частоти отримання інформації, кількості геодезичних марок і т.д. вибирається метод геодезичних вимірювань. Для вирішення задач на лінійних спорудах часто застосовують створні методи. В статті [98] виконано порівняльний аналіз методу бокового нівелювання оптичним теодолітом та полярного методу визначення координат електронним тахеометром. Серед недоліків застосування оптичного теодоліта виділено: складність в забезпеченні перпендикулярності рейки до створу, значні затрати часу на виконання спостережень, обов'язковий доступ до об'єкту, робоча висота проведення вимірювань до 1,5 м, зміщення визначаються лише по координаті Y . В той час застосування електронного тахеометра в координатному режимі має набагато більше переваг ніж недоліків. Серед них: зменшення часу на польові роботи, отримання результатів в цифровому вигляді, можливість визначення просторових координат та їх зміну в часі.

Важливою перевагою електронних тахеометрів в порівнянні з оптичними геодезичними приладами є можливість дистанційно виконувати виміри, а також їх автоматизація [135].

Наземне лазерне сканування також відноситься до безконтактних видів знімання. На відміну від електронних тахеометрів, які визначають просторові координати окремих точок, лазерні сканери формують довкола себе хмару

точок, на основі якої створюється 3D модель. Технологію лазерного сканування раціонально використовувати для знімання складних інженерних або архітектурних споруд [49, 30]. А також в тих випадках, коли потрібно отримати максимальну кількість інформації про геометричні характеристики об'єкта.

Завдяки високому ступеню автоматизації та оперативності процесу збору даних, лазерне сканування використовують для деформаційного моніторингу тунелів в реальному часі [152, 143].

Удосконалення сучасних моделей лазерних сканерів та програмного забезпечення для них дозволяють докорінно змінити методику польових робіт і суттєво прискорити опрацювання результатів знімання. Мобільні лазерні скануючі системи встановлюють на транспортний засіб з можливістю виконання знімання під час руху. Такі системи застосовують для сканування автодорожнього та залізничного полотна [129, 50]. Їх комбінація з GNSS обладнанням забезпечує виконання геоприв'язки хмари точок.

Специфіка традиційних геодезичних вимірів передбачає використання оптичного діапазону хвиль. Це породжує ряд особливостей: необхідність забезпечення прямої видимості, труднощі при організації цілодобових та динамічних спостережень. Альтернативний підхід для проведення геодезичного моніторингу полягає в застосуванні глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS).

Загальні вимоги до застосування GNSS методів залишаються такими ж, що й для традиційних геодезичних методів. А саме: місця встановлення приладів повинні бути доступними; пункти на яких проводяться спостереження повинні бути стабільними і дозволяти точно центрувати прилади. При цьому розташування пунктів повинно забезпечувати видимість на небосхил для спостереження супутників. Не слід розташовувати пункти всередині металевих огорож, поруч з високими спорудами, деревами з широкими кронами, а також поблизу обладнання, яке створює потужне електромагнітне поле.

Системи геодезичного контролю на основі GNSS обладнання набули широкого застосування для моніторингу лінійних об'єктів. Завдяки швидкому розвитку, супутникові технології надійно замінюють лінійно-кутові виміри в мережах на великих гідрологічних об'єктах. Встановлені на гребені бетонних дамб, приймачі з високою точністю та в автоматизованому режимі визначають найменші відхилення від проектного положення [43]. Система моніторингу найбільшого в світі підвісного мосту Цинь Ма, в Гонконзі, складається з п'яти підсистем [141]. Серед них дві базові станції та 27 GPS приймачів, які в режимі реального часу передають інформацію про положення головних тросів, покриття та опор мосту. Двочастотні приймачі забезпечують збір даних з частотою 10 Гц (10 разів в секунду). При цьому точність визначення планового положення контрольних точок – 10мм, висотного – 20 мм.

1.4 Огляд сучасних геодезичних приладів та засобів для моніторингу трубопровідних систем

Протягом останніх десятиліть темпи модернізації геодезичного обладнання, розширення їх функціональних особливостей і поліпшення технічних характеристик багатократно зросли. Сучасні геодезичні прилади можна розділити на декілька груп: геодезичне GNSS обладнання, електронні тахеометри, цифрові нівеліри, лазерні сканери та інші контрольно-вимірювальні пристрої. Кожна із вищевказаних груп має своє призначення та оптимальну область застосування. Для інженерно-геодезичних робіт, зокрема в галузі моніторингу об'єктів нафто-газотранспортного комплексу, знаходять своє застосування найрізноманітніші геодезичні прилади. Використання сучасних модернізованих приладів виводить геодезичний контроль на новий рівень, який здатний забезпечити надійний і оперативний контроль експлуатаційної надійності інженерних об'єктів.

В 2005 р. компанія CMSI-Bell, J.V., що обслуговує Трансаяскінську трубопровідну систему (США), розпочала моніторинг трубопроводу з

допомогою вдосконалених технологій GPS і тривимірного лазерного сканування [142]. Дані технології були створені для підвищення продуктивності і ефективності моніторингу системи. Раніше для планово-висотного контролю шести ключових ділянок бригаді з п'яти чоловік необхідно було затратити 21 день на виконання тахеометричного знімання. Впровадження комплексу лазерного сканування разом з GPS координуванням дало змогу досягнути точності 1,5 см в плані і 2,1 см з висотою, а також зменшити кількість працівників в бригаді до двох осіб.

Такі об'єкти газотранспортної системи як компресорні станції характеризуються високою щільністю технологічного обладнання. Детальне знімання усього видимого обладнання (клапани, сферичні клапани, контрольні виходи, фланці, манометри та ін.) і спеціальних об'єктів, що підлягають зніманню (засоби зв'язку, будівлі, огорожі) значно спрощується із застосуванням наземних лазерних сканерів. Результат знімання відображається в цифровому виді з можливістю доповнення семантичної інформації [145].

Для визначення положення об'єктів лінійних споруд створюють супутникові мережі у вигляді витягнутого ряду трикутників. Такі мережі називають траверсними. Визначення висот об'єктів нафтопроводу, довжиною 650 км, виконувалось з допомогою трьох двочастотних приймачів [54]. Для цього була створена траверсна супутникова мережа з довжинами векторів 1,5-25 км. При цьому похибка визначення висотного положення точок нафтопроводу досягала 5-7 см.

Така точність не достатня для проведення планових обстежень надземних переходів трубопроводів. Але досягнути необхідної точності можливо завдяки зменшенню довжин векторів. Для цього потрібно створювати локальну опорну геодезичну основу. Недоліком застосування методу залишається необхідність пересування працівників на трубопроводі з GNSS приймачем.

Комбінація засобів аерознімання і GNSS обладнання актуальна для проведення моніторингу лінійної частини магістральних трубопроводів [136]. В порівнянні з наземними методами, матеріальні витрати на один кілометр трубопроводу для такого способу контролю є найменшими. Перевагою аерознімання є можливість отримати додаткову інформацію про положення річкових русел, зміни в рослинному покриві, активізацію ерозійних процесів вздовж траси [133].

Розглянемо можливість застосування аерознімання для моніторингу надземних переходів газопроводів. Варто підкреслити, що надземні переходи споруджують в місцях перетину газопроводом річок, ярів та інших перешкод. Тому не раціонально піднімати в повітря літак або вертоліт для знімання окремих переходів, довжиною кількисот метрів. Крім цього, у випадку аварійних ситуацій, не завжди можна замовити виконання аерознімання в короткі терміни. Альтернативним варіантом є використання малих безпілотних літальних апаратів.

Більшість сучасних систем моніторингу трубопровідних систем, які розробляються в світі, зорієнтовані на автоматизацію проведення вимірювань. Це дає змогу забезпечити експлуатаційну надійність вздовж усієї споруди. Задача автоматизації розв'язується за рахунок системи, що містить опто-електричні ланцюжки, розміщені на конструкціях трубопроводу [148, 16]. Затрати на встановлення і експлуатацію оптоволоконних систем в рази перевищують вартість робіт пов'язаних з наземними обстеженнями або результатами аерознімання. Зате така система дає змогу попереджати виникнення аварійних ситуацій з можливістю точного позначення для оперативного реагування. Якщо задаватися запитанням щодо доцільності застосування таких дорогих систем, то відповідь можна знайти порівнюючи вартість моніторингу з набагато більшими затратами на ліквідацію наслідків можливих аварій.

В статті [150] описано систему створену для моніторингу великогабаритного обладнання, в тому числі і трубопроводів. Оцінка

параметрів деформацій виконується на основі даних зображень, отриманих при зніманні цифровою камерою з високою роздільною здатністю. Величина деформацій визначаються за результатами опрацювання ряду знімків на основі муарового ефекту. На відміну від методу кореляції цифрових зображень, який працює з випадковим зображенням, метод на основі муарового ефекту спрощує процес опрацювання даних. Експериментальні дослідження дозволили визначати температурні деформації металу труб з субміліметровою точністю.

Вчені працюють над удосконаленням методу, зокрема над покращенням якості зображень. Для цього необхідно знизити вплив вібрацій камери та флуктуацій повітряних потоків під час зйомки. В майбутньому метод планується застосовувати для моніторингу мостів та висотних споруд.

В роботі [32] наведений алгоритм дослідження короткоперіодичних зміщень опор напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС. Геодезичні виміри виконувались з допомогою роботизованого електронного тахеометра Leica TPS 1201. Даний прилад був використаний для забезпечення високоточних вимірювань кутів та ліній з точністю 1". Електронні тахеометри даного класу підтримують геодезичну систему моніторингу, яка дозволяє в автоматичному режимі виконувати повторні вимірювання на контрольні точки. Прилад обладнаний сенсором, який дає змогу автоматично знаходити відбивач і точно наводитись на нього [33].

Концепція застосування приладів для безконтактних вимірювань з високим ступенем автоматизації підштовхує до використання сучасних електронних тахеометрів з можливістю вимірювання віддалі без відбивача. Серед переваг застосування тахеометра у безрефлекторному режимі можна виділити такі: безпека виконавця (немає необхідності в наближенні до потенційно небезпечних місць), скорочення часу проведення спостережень, доступ до практично всіх елементів конструкцій. Але в залежності від матеріалу поверхні, на який ведеться спостереження, точність вимірювання

віддалі може істотно змінюватись. Крім цього на точність і дальність вимірювання віддалі впливає кут візування на поверхню.

Багато вітчизняних та закордонних публікацій присвячено дослідженню безрефлекторного режиму при наведенні на поверхні, які виготовлені з різних матеріалів [104, 131]. Для кожного з них спостерігається зниження точності вимірювань при збільшенні кута падіння променя. В залежності від величини коефіцієнта відбивання, ця залежність змінюється по-різному. Записати математичну залежність можна зібравши достатню кількість емпіричних даних для відповідної поверхні.

В роботі [69] приведені результати досліджень електронного тахеометра Sokkia 530RK у безрефлекторному режимі при наведенні на поверхню надземного газопроводу. Визначено оптимальне положення станції тахеометра для виконання знімання поверхні трубопроводу.

Подібні дослідження дають змогу розробити рекомендації для використання безрефлекторного режиму вимірювань під час геодезичного моніторингу інженерних споруд.

1.5. Висновки до розділу 1. Формулювання задачі дослідження

Проаналізовано сучасний стан геодезичного забезпечення контролю за надземними переходами магістральних газопроводів. Наведені причини порушень ефективної і безпечної роботи надземних трубопроводів, що споруджені в Західно-Українському регіоні.

Огляд літератури підтвердив відсутність вітчизняних нормативних документів, що регламентують порядок, склад і точність геодезичних робіт для контролю стану надземних переходів газопроводів.

Критичний аналіз існуючих методів вказує на ряд недоліків. Серед них можна виділити такі: застосування оптичних приладів (нівеліри, теодоліти) та мірних стрічок збільшує час на виконання робіт; підготовчі роботи перед початком вимірювань постійно вимагають пересування обслуговуючого персоналу на трубопроводі, що не відповідає вимогам техніки безпеки;

класичні методи лінійно-кутових вимірів дозволяють визначати лише одну складову зміщень (поздовжню або поперечну) для контролю положення опор та осі трубопроводу; методика спостережень є громіздкою і складною для реалізації в умовах пересіченого рельєфу; використання підвісних рейок ускладнюється на переходах через річки з високими опорами.

Обґрунтовано ефективність застосування електронних тахеометрів для проведення геодезичного моніторингу надземних переходів.

Відзначено необхідність обґрунтування точності геодезичних спостережень та аналізу факторів навколишнього середовища, які створюють вплив на ділянку газопроводу.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ТОЧНОСТІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ЗМІЩЕННЯМИ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ ГАЗОПРОВОДІВ

Одним з основних завдань геодезичної науки і практики під час спорудження будівель, монтажу технологічного обладнання і проведення контролю за технічним станом цих об'єктів в процесі експлуатації є встановлення необхідної точності вимірювань [34, 66].

Необхідна точність – це величина допустимої похибки визначення зміщень відносно стійкого пункту, який вважають вихідним. Часто крім допустимої похибки визначення зміщень задається також величина допустимої похибки нерівномірності зміщення (осідання) двох будь-яких точок на які ведеться спостереження, розташованих на певній віддалі одна від одної.

Щоб досягнути необхідної точності визначення переміщень надземних переходів магістральних газопроводів, регламентованої відповідними нормативними документами [80, 91], необхідно враховувати дію кількох факторів. Одним із них є температура поверхні труби, яка є змінною за довжиною та в часі величиною. В основному її визначають температура газу, що транспортується, і температура навколишнього середовища [47]. Зміна температури повітря протягом доби спричиняє циклічні температурні переміщення, які слід враховувати під час встановлення точності спостережень за деформаціями газопроводів.

Встановлення необхідної і достатньої точності вимірювань – дуже важливий етап, оскільки від нього залежить вибір методу і приладів для вимірювань [62], а в кінцевому результаті – витрати часу та матеріальних ресурсів на виконання проекту.

2.1. Точність геодезичних робіт для спостереження за осіданнями опор надземних трубопроводів

З метою розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки несучої здатності трубопроводу визначають фактичний профіль осі балкового переходу. Знімання профілю осі переходу виконується геодезичними методами. Для вибору оптимальної методики контролю висотного положення опор трубопроводу, а також приладів для проведення даних робіт необхідно виконати апріорний розрахунок точності геодезичних робіт. Точність встановлюють на основі величини допустимого вертикального зміщення опори. В свою чергу допустиме зміщення опори визначають виходячи з перевірки трубопроводу на міцність.

Розрахунковий опір надземного трубопроводу залежить від таких параметрів як діаметр труби, товщина стінки, довжина прогону між опорами. Необхідно встановити, як змінюється величина допустимого осідання опори та відповідно точність геодезичних робіт в результаті зміни вказаних параметрів.

Сьогодні для визначення вертикальних деформацій опор надземних трубопроводів застосовують метод геометричного нівелювання. Визначення допустимих величин осідань опор дасть змогу говорити про можливість застосування електронних тахеометрів для даних робіт, використовуючи технологію безрефлекторних спостережень [69]. Режим наведення електронного тахеометра (на плівковій відбивачі або безрефлекторний режим) визначатиметься залежно від довжин візирних променів.

2.1.1. Визначення допустимої величини осідання опори надземного трубопроводу

Необхідна точність геодезичних робіт для моніторингу положення опор трубопроводу пов'язана з допустимим рівнем напружено-деформованого стану трубопроводу. Наведемо формули для розрахунку трубопроводу за граничним станом (границею плинності матеріалу) [89]:

$$\sigma_{noz.p} + \sigma_{зг.} + \sigma_{\rho} + \sigma_{\Delta} \leq R_2, \quad (2.1)$$

де $\sigma_{noz.p}$ – поздовжні напруження від дії внутрішнього тиску; $\sigma_{зг.}$ – напруження згину від вертикальних навантажень; σ_{ρ} – напруження від попереднього пружного згину труби у вертикальній площині; σ_{Δ} – напруження від осідання опори; R_2 – розрахунковий опір трубопроводу.

$\sigma_{noz.p}$ – поздовжні напруження від дії внутрішнього тиску:

$$\sigma_{noz.p} = \frac{p}{2} \left(\frac{D_{зов}}{2\delta} - 1 \right), \quad (2.2)$$

p – розрахунковий внутрішній тиск; $D_{зов}$ – зовнішній діаметр трубопроводу; δ – товщина стінки труби.

$\sigma_{зг.}$ – напруження згину від вертикальних навантажень:

$$\sigma_{зг.} = \frac{\eta l^2}{W}, \quad (2.3)$$

W – момент опору труби; l – довжина прогону між опорами; η – навантажувальний коефіцієнт ($\eta=0,0833q$). Тут q – повне розрахункове рівномірно розподілене вертикальне навантаження. Для надземних трубопроводів сюди входять навантаження від власної ваги трубопроводу ($q_{тр}$), ваги продукту ($q_{пр}$), що транспортується, снігове (q_c) та льодове ($q_{льод}$) навантаження, вітрове навантаження (q_v) [89].

Навантаження від власної ваги труби

$$q_{тр} = \frac{\pi}{4} (D_{зов}^2 - D_{вн}^2) \gamma_{ст} 100, \quad (2.4)$$

або з деяким наближенням, але достатньо точним для практичних розрахунків:

$$q_{тр} = \pi D_{cp} \delta \gamma_{ст} 100 = 2,47 D_{cp} \delta,$$

де $D_{зов}$, $D_{вн}$ – зовнішній та внутрішній діаметр труби; $D_{cp} = D_{зов} - 0,5\delta$ – середній діаметр труби; δ – товщина стінки труби; $\gamma_{ст}$ – густина металу.

Навантаження від ваги природного газу, що транспортується трубопроводом, можна обчислити за формулою

$$q_{газ} \approx p D_{вн}^2. \quad (2.5)$$

Навантаження від обмерзання і снігу. Для трубопроводу навантаження від обмерзання більше за значенням, ніж від снігу. Величина навантаження від снігу переважає за значенням для пішохідних містків і прилеглих до них трубопроводів (приймається загальна ширина). Товщину шару льоду приймають у відповідності з картою кліматичних районів ожеледі. Територія України знаходиться в межах *II* району (північ та центр України), для якого товщина шару льоду дорівнює 1 см та *III* району (південь та захід України) – 1,5 см. Для труби вага обмерзання:

$$q_{\text{льод}} = \pi D_{\text{зов}} \delta_{\text{льод}} \gamma_{\text{льод}}, \quad (2.6)$$

де $D_{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр трубопроводу; $\delta_{\text{льод}}$ – товщина шару льоду; $\gamma_{\text{льод}}$ – густина льоду.

Для окремо розташованого трубопроводу (без примикання до нього настилу містка) розрахункова вага обмерзання при коефіцієнті перевантаження, що дорівнює 1,2:

$$q_{\text{льод}} \approx k_{\text{льод}} D_{\text{зов}}, \quad (2.7)$$

де $k_{\text{льод}}$ – коефіцієнт, прийнятий для району *II* – 35, для району *III* – 50.

Снігове навантаження приймають на 1 м² горизонтальної проекції конструкції (місток і дотична до нього труба). Вагу визначають в залежності від району розташування трубопроводу. Коефіцієнт перевантаження для снігу $n_c=1,4$. Для одного трубопроводу розрахункове снігове навантаження можна прийняти таким, що дорівнює:

$$q_c = n_c c_n P_0^c \approx a D_{\text{зов}}, \quad (2.8)$$

де P_0^c – нормативна вага снігового покриву на 1 м² горизонтальної поверхні; c_n – коефіцієнт, що залежить від форми поверхні; a – коефіцієнт, що приймається для *II* району – 35, *III* району – 50; $D_{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр.

Вітрове навантаження направлене горизонтально. Його величина залежить від району будівництва, висоти споруди над землею і форми її поверхні. На один трубопровід перпендикулярно до його осі діє навантаження:

$$q_в = c_n Q D_{\text{зов}} = 0,6 n_в Q D_{\text{зов}}, \quad (2.9)$$

де $c = 0,6$ – аеродинамічний коефіцієнт для однієї труби; $n_e = 1,3$ – коефіцієнт перевантаження для вітру; Q – швидкісний потік вітру; $D_{зов}$ – зовнішній діаметр труби.

Для розрахунку трубопроводів сукупність навантажень приймають в найнесприятливіших комбінаціях:

$$q = q_{mp} + q_{np} + q_c + q_{льод} + q_e. \quad (2.10)$$

σ_ρ - напруження від попереднього пружного згину труби у вертикальній площині:

$$\sigma_\rho = \frac{ED_{зов}}{2\rho}, \quad (2.11)$$

ρ – радіус кривини осі труби в місці згину; E – модуль пружності металу труб.

σ_Δ – напруження від осідання опори (визначаються як в нерозрізній багатопрогінній балці):

$$\sigma_\Delta = \frac{aEI\Delta}{Wl^2} = \frac{aED_{зов}\Delta}{2l^2}, \quad (2.12)$$

I – момент інерції перерізу труби; Δ – величина осідання опори; a – коефіцієнт (для опорного перерізу $a=4,3924$, для перерізу в середині прогону від зміщення опори $a=1,0192$).

R_2 – розрахунковий опір трубопроводу:

$$R_2 = \frac{R_2^m}{K_2 K_n}, \quad (2.13)$$

m – коефіцієнт умов роботи трубопроводу ($m=0,6-0,9$ залежно від категорії); K_n – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу; K_2 – коефіцієнт надійності для матеріалу; R_2^m – нормативний опір металу труби, що дорівнює мінімальному значенню границі плинності.

Підставляючи в формулу (2.1) відповідні вирази для σ , отримаємо:

$$\frac{p}{2} \left(\frac{D_{зов}}{2\delta} - 1 \right) + \frac{\eta l^2}{W} + \frac{ED_{зов}}{2\rho} + \frac{aED_{зов}\Delta}{2l^2} \leq \frac{R_2^m}{K_2 K_n}. \quad (2.14)$$

При надземному прокладанні трубопроводів окремі ділянки роблять прямими, а необхідні повороти виконують з допомогою вставки вигнутих труб. Напруження від попереднього пружного згину труби у вертикальній площині виникають лише у випадку відхилення осі трубопроводу від прямолінійності [70].

2.1.2. Точність геодезичних спостережень за вертикальними зміщеннями опор, як детермінована величина

Принцип обґрунтування точності геодезичного контролю базується на необхідності отримання вимірних величин деформацій із заданою ймовірністю, з врахуванням будівельних допусків і забезпечення різного порядку величин деформацій і похибок їх визначення. Такий принцип обґрунтування точності отримав подальший розвиток в статті [35], де точність геодезичних спостережень за деформаціями споруди пропонується розглядати як детерміновану величину. Точність спостережень змінюватиметься в залежності від ступеня наближення контролюючих параметрів деформацій до їх допустимих значень – чим ближче допустиме значення, тим точніший контроль.

Застосування властивості детермінованості буде коректним для обґрунтування точності спостережень за осіданнями опор надземних трубопроводів. В момент часу τ_0 , який відповідає періоду закінчення будівництва, точність спостереження визначатиметься як для трубопроводу, вісь якого прямолінійна. У процесі експлуатації споруди, на момент τ , точність може змінюватись в результаті нерівномірного осідання опор. Стріли прогину, які при цьому виникають, будуть концентраторами додаткових напружень [41], які слід враховувати для обчислення допустимих осідань опор трубопроводу.

Точність геодезичного контролю за осіданнями опор на момент τ_0 визначатиметься за формулою [74]

$$m_{\Delta}(\tau_0) = 0,1\Delta_{\text{дон}}(\tau_0), \quad (2.15)$$

де 0,1 – коефіцієнт переходу від величини допустимого осідання до середньої квадратичної похибки, $\Delta_{don}(\tau_0)$ – величина допустимого осідання опори.

Представимо формулу (2.14) без врахування напружень від попереднього пружного згину трубопроводу у вертикальній площині. Тоді допустиме осідання опори :

$$\Delta_{don}(\tau_0) = \frac{2l^2}{aED_{306}} \left[\frac{R_2^H m}{K_2 K_H} - \frac{p}{2} \left(\frac{D_{306}}{2\delta} - 1 \right) - \frac{\eta l^2}{W} \right]. \quad (2.16)$$

В табл. 2.1 наведені результати розрахунку допустимої величини осідання опори для кількох марок трубопровідних сталей та для різних довжин прогонів, а також розрахункова точність геодезичних вимірів.

Таблиця 2.1

Результати розрахунку точності визначення вертикальних зміщень опор трубопроводів

Робочий тиск, МПа	Зовнішній діаметр труби, мм	Товщина стінки, мм	Границя плинності матеріалу, Н/мм ²	Допустиме вертикальне зміщення опори, мм			Середня квадратична похибка визначення зміщення опори, мм		
				Довжини прогонів між опорами, м					
				20	30	40	20	30	40
7,4	1420	16,2	470	113	207	249	11	20	24
7,4	1420	15,7	460	104	187	210	10	18	21
9,8	1420	23,9	510	147	295	433	14	29	43
9,8	1420	25,8	481	140	281	412	14	28	41
7,4	1420	18,7	461	124	235	311	12	23	31

З табл. 2.1 бачимо, що мінімальна середня квадратична похибка визначення вертикального зміщення опори становить 10 мм.

Визначимо необхідну лінійно-кутову точність електронного тахеометра для дослідження осідань опор з вказаною точністю. Розрахунки виконуватимемо з врахуванням того, що вимірювання тахеометром проводиться з однієї станції, а візування виконують на плівковій відбивачі, закріплені на опорах, одним прийомом. Точність визначення висотного положення марки, розташованої на опорі, обчислюють за формулою [109]:

$$m_h = \sqrt{(m_D \cos Z)^2 + \left(D \sin Z \frac{m_Z}{\rho} \right)^2}, \quad (2.17)$$

де D – виміряна похила віддаль, Z – вимірний зенітний кут, m_Z – середня квадратична похибка виміру зенітного кута; m_D – середня квадратична похибка виміру віддалі. Вважатимемо, що похибки кутових і лінійних

вимірів однаково впливають на точність визначення положення марки. Тоді формулу (2.17) запишемо:

$$m_h = \sqrt{2m_0^2},$$

тоді

$$m_D \leq \frac{m_h}{\cos Z \sqrt{2}}; m_Z \leq \frac{m_h \cdot \rho''}{D \sin Z \sqrt{2}}. \quad (2.18)$$

Для забезпечення високої точності визначення перевищень на станції електронним тахеометром, висоту деформаційних марок, закріплених на опорах, необхідно обмежувати. Рекомендується встановлювати деформаційні марки на висоті горизонту приладу [78]. Тому значення зенітного кута Z приймемо близьким до 90° .

Розрахуємо допустимі значення лінійно-кутової точності електронного тахеометра для різних варіантів наведення на марку. Приймемо значення $m_h=0,01$ м. Дані розрахунків наведемо в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Допустимі значення СКП лінійних та кутових вимірів

	Віддаль до марки S , м				Зенітний кут Z
	50	100	150	200	
m_D m_Z	81 мм 29"	81 мм 15"	81 мм 10"	81 мм 7"	85°
m_D m_Z	405 мм 29"	405 мм 15"	405 мм 10"	405 мм 7"	90°
m_D m_Z	81 мм 29"	81 мм 15"	81 мм 10"	81 мм 7"	95°

Аналізуючи значення табл. 2.2 бачимо, що сучасні електронні тахеометри дають змогу забезпечити необхідну точність визначення висотного положення деформаційної марки.

Вираз для обчислення точності геодезичного контролю за осіданнями опор в будь-який момент експлуатації споруди τ , матиме вигляд:

$$m_\Delta(\tau) = 0,1\Delta_{\text{дон}}(\tau), \quad (2.19)$$

де $\Delta_{\text{дон}}(\tau)$ – величина допустимого осідання опори на момент τ :

$$\Delta_{\text{дон}}(\tau) = \frac{2l^2}{aED_{306}} \left[\frac{R_2^H m}{K_2 K_H} - \frac{p}{2} \left(\frac{D_{306}}{2\delta} - 1 \right) - \frac{\eta l^2}{W} - \frac{ED_{306}}{2\rho} \right]. \quad (2.20)$$

На відміну від (2.16), формула (2.20) містить доданок, який враховує напруження від пружного згину труби у вертикальній площині. Напруження від попереднього пружного згину характеризується радіусом кривини ρ , якою апроксимується вісь трубопроводу (2.11). Залежність між радіусом осі та стрілою прогину (рис. 2.1) визначається за формулою [103]

$$\rho = \frac{L^2}{8f} = \frac{4l^2}{8f} = \frac{l^2}{2f}, \quad (2.21)$$

де f – стріла прогину; l – віддаль між опорами.

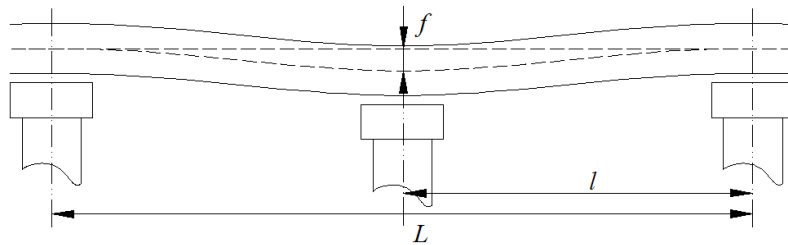


Рис. 2.1 Схема стріли прогину трубопроводу, утворена в результаті осідання опори

Підставляючи (2.21) в (2.20), отримаємо:

$$\Delta_{\text{дон}}(\tau) = \frac{2l^2}{aED_{306}} \left[\frac{R_2^H m}{K_2 K_H} - \frac{p}{2} \left(\frac{D_{306}}{2\delta} - 1 \right) - \frac{\eta l^2}{W} - \frac{ED_{306}f}{l^2} \right]. \quad (2.22)$$

Перегрупувавши доданки в (2.22), можемо записати:

$$\Delta_{\text{дон}}(\tau) = \frac{2l^2}{aED_{306}} \left[\frac{R_2^H m}{K_2 K_H} - \frac{p}{2} \left(\frac{D_{306}}{2\delta} - 1 \right) - \frac{\eta l^2}{W} \right] - \frac{2f}{a} = \Delta_{\text{дон}}(\tau_0) - \frac{2f}{a}, \quad (2.23)$$

де f – стріла прогину, $a=4,3924$ – сталий коефіцієнт.

Тоді з врахуванням (2.23), формула для розрахунку середньої квадратичної похибки визначення осідання опори в момент τ матиме вигляд:

$$m_{\Delta}(\tau) = 0,1 \left[\Delta_{\text{дон}}(\tau_0) - 0,4553|f| \right]. \quad (2.24)$$

Стрілу прогину f можемо виразити через відмітки сусідніх опор:

$$f = H_2 - \frac{H_1 + H_3}{2}.$$

А оскільки отримане значення величини f може приймати як додатне так і від'ємне значення, – в (2.24) беремо його по модулю. Враховуючи, що максимальний розрахунковий радіус пружного згину трубопроводу становить $\rho_{max}=900D$ [20], максимальне значення стріли прогину розраховується за формулою

$$f_{max} = \frac{l^2}{1800D}. \quad (2.25)$$

2.2. Оцінка впливу короткоперіодичних горизонтальних зміщень надземних газопроводів на точність геодезичних спостережень

Результати геодезичних спостережень за деформаціями будь-якої споруди інтегрують в собі закономірності складної взаємодії системи “споруда-навколишнє середовище”. Встановлення таких закономірностей може бути корисним не лише для проведення геодезичного контролю, але й для їх врахування при проектуванні нових споруд. В підсистему “навколишнє середовище” входять короткочасні навантаження від факторів несилового впливу. До них відносяться: зміна температури зовнішнього середовища, атмосферна і ґрунтова волога, сонячна радіація. Процес зміни температури повітря і горизонтальні переміщення трубопроводу мають гармонічний характер. При цьому проявляються високочастотні добові коливання і основна гармоніка, яка має сезонний характер. Найбільший вплив на точність результатів спостережень буде створювати дисперсія високочастотних коливань, які можуть перевищувати похибки безпосередніх вимірів. В залежності від зміни температури положення осі надземного трубопроводу змінюється в межах 10 мм і більше [103].

Важливим завданням є встановлення співвідношення між вхідними факторами (фактори теплового впливу) та вихідною реакцією конструкції (горизонтальні зміщення трубопроводу). Таку задачу можна вирішити з допомогою характеристик динамічних систем [36].

2.2.1. Дослідження добових температурних переміщень надземних переходів газопроводів

Тепловий фактор силового впливу на надземні переходи газопроводів часто має нестационарний і випадковий характер. Теплові процеси, викликані впливом сонячної радіації та швидкістю передавання тепла від навколишнього середовища до трубопроводу, не дозволяють визначати температуру газопроводу теоретичним шляхом на достатньо високому рівні точності. Тому доцільно виконати експериментальні дослідження залежності між температурою атмосферного повітря та переміщеннями трубопроводу.

Програма експериментальних досліджень передбачала проведення кількох циклів спостережень за положенням трубопроводу та його опорами синхронно з вимірюванням температури атмосферного повітря. Графік зміни температури повітря впродовж досліджень відображено на рис. 2.2.

Спостереження проводились в червні місяці з 5:00 до 19:00 з проміжком у 20 хвилин. Цей період доби охопив широкий діапазон зміни температури повітря. Методика контролю добових деформацій надземних переходів газопроводів передбачає комплекс польових і камеральних робіт.

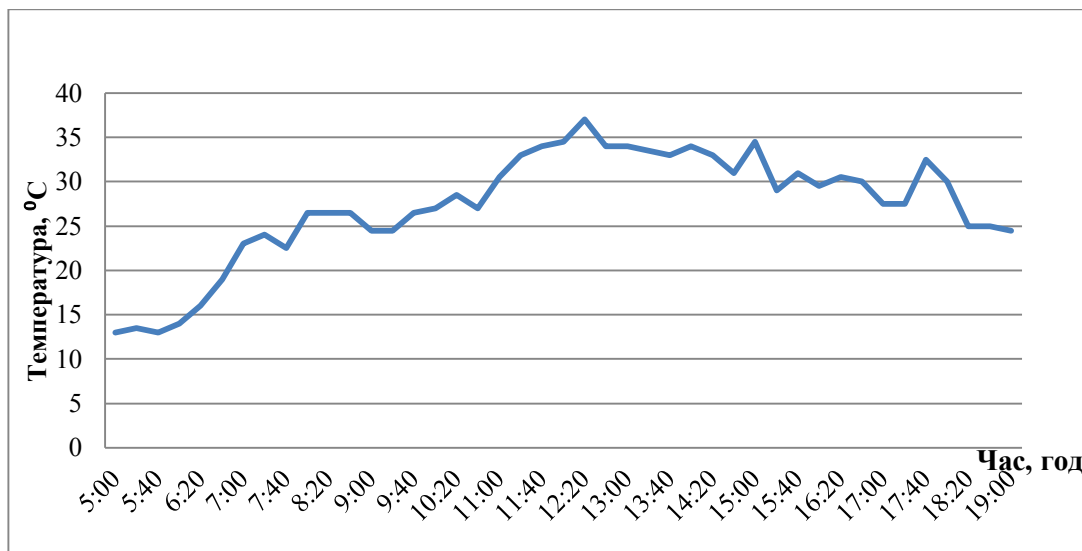


Рис. 2.2 Графік зміни температури повітря

Польові роботи. Дослідження проводилися на діючому газопроводі, $D=1420$ мм (рис 2.3).



Рис. 2.3 Надземний перехід газопроводу “Уренгой – Помари – Ужгород”
через р. Бистриця Солотвинська

Для вимірювань використовувався електронний тахеометр Sokkia SET 530RK [105]. Тахеометр Sokkia SET530 RK (серійний номер 148942), який використовувався для проведення дослідів, був сертифікований та пройшов метрологічну атестацію. Перед проведенням польових робіт були виконані перевірки приладу. Особлива увага надавалася перевіркам, невиконання яких могло б привести до нагромадження систематичних похибок. Зокрема це перевірка компенсатора нахилу вертикальної осі приладу, перевірка колімаційної похибки та місця нуля вертикального круга, перевірка співпадання візирної осі з робочою віссю далекоміра. Після проведення комплексу перевірок було зроблено висновок про те, що усі геометричні умови приладу виконуються, а параметри, які контролюються, не перевищують допустимих значень.

Для дослідження була вибрана ділянка газопроводу завдовжки 80 м, що розташована в межах трьох опор. Положення труби визначалося в координатному режимі тахеометра шляхом наведення на п'ять відбиваючих плівок, встановлених на поверхні досліджуваної ділянки (рис. 2.4).

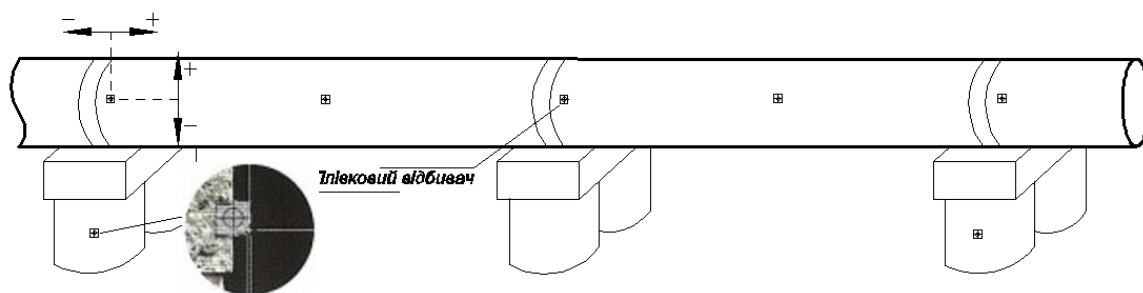


Рис. 2.4 Схема розташування деформаційних марок на поверхні газопроводу

З метою контролю положення тахеометра та уникнення впливу систематичних похибок впродовж спостережень, додатково виконувалося наведення на контрольну точку (відбивач, встановлений на штативі), розташовану на віддалі близько 85 м. Схему розташування приладу (точка *A*) і контрольної точки (точка *B*) показано на рис. 2.5.

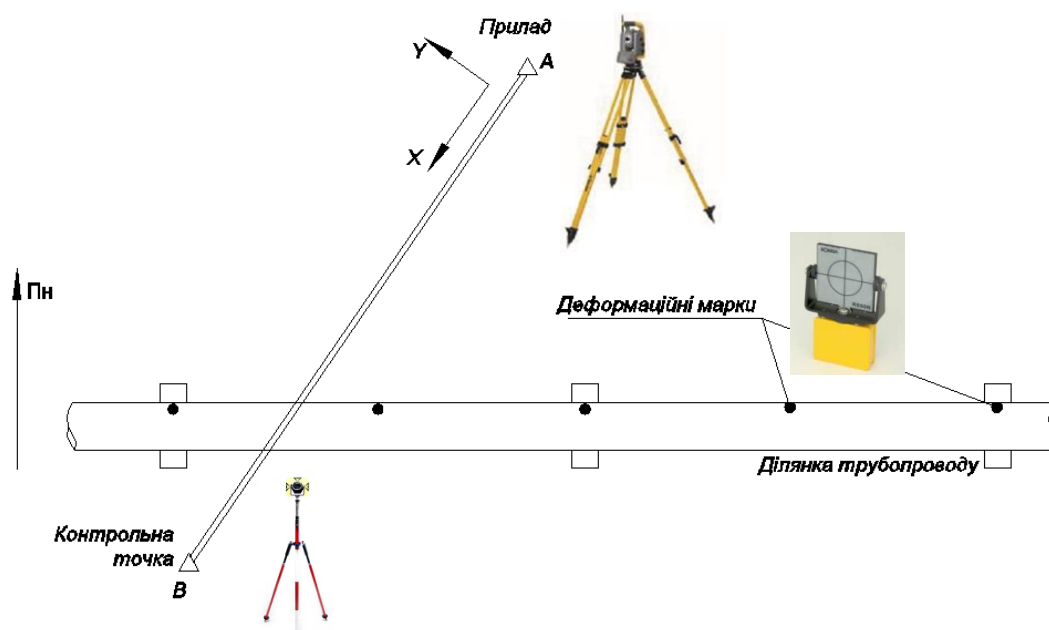


Рис. 2.5 Схема розташування електронного тахеометра і контрольної точки

Для збереження чистоти експерименту, місця встановлення електронного тахеометра і контрольної точки були вибрані таким чином, щоб максимально зменшити вплив навколишнього середовища. Тахеометр і відбивач на штативі (контрольна точка) були встановлені під кронами дерев. Тому впродовж періоду спостережень вони були захищені від потрапляння на них прямих сонячних променів.

Нуль лімба електронного тахеометра був зорієнтований на контрольну точку. Таким чином, напрямок осі абсцис збігався із напрямком на контрольну точку. Це давало змогу легко контролювати стійке положення приладу впродовж усього часу спостережень.

Кожен цикл спостережень передбачав визначення координат восьми точок: контрольної точки, координат п'яти плівкових відбивачів і координат точок на двох опорах. Для оцінки точності результатів спостережень було виконано 30 прийомів визначення координат кожної деформаційної марки.

Камеральне опрацювання даних. Для перевірки гіпотези про наявність температурних деформацій трубопроводу впродовж періоду спостережень, використано метод послідовних різниць (критерій Аббе) [3]. Суть методу полягає в наступному. Дисперсію результатів спостережень можна оцінити двома способами: звичайним

$$\sigma^2[x] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.26)$$

і обчисленням суми квадратів послідовних (в порядку проведення вимірювань) різниць $(x_{i+1} - x_i)$:

$$Q^2[x] = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2. \quad (2.27)$$

Обчислено дисперсії для координат X, Y, H п'яти деформаційних марок на трубопроводі, для двох марок на опорах і для контрольної точки. Кожна з восьми вибірок складалася з 30-ти послідовних прийомів визначення координат і 41-го прийому визначення координат, отриманих за період спостережень ($n=71$).

Якщо в процесі вимірювань відбулося зміщення центру групування результатів спостережень, тобто мали місце зміщення марок вздовж координатних осей, то $\sigma^2[x]$ дає перевищену оцінку дисперсії результатів спостережень. Це пояснюється тим, що на $\sigma^2[x]$ впливають варіації x . В той же час зміна центру групування x майже не впливає на значення послідовних різниць $d_i = (x_{i+1} - x_i)$. Тому зміна \bar{x} не відображається на результаті $Q^2[x]$.

Відношення $v = Q^2[x] / \sigma^2[x]$ є критерієм для перевірки гіпотези. Якщо отримане значення критерію Аббе v менше табличного значення v_p при заданому рівні значущості p і кількості спостережень n , то гіпотеза про постійність центру групування результатів спостережень відкидається. Тобто підтверджується наявність зміщень деформаційної марки в ході спостережень. Результати перевірки гіпотези наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Перевірка гіпотези про наявність зміщень деформаційних марок за критерієм Аббе

Назва деформаційної марки	Розраховане значення критерію Аббе, v			Табличне значення критерію Аббе, v_p
	X	Y	H	
Контрольна точка	0,904	1,272	0,949	0,814 ($p=0,05$ $n=71$) 0,735 ($p=0,01$ $n=71$)
Марка 1	0,652	0,352	0,841	
Марка 2	0,692	0,298	0,790	
Марка 3	0,379	0,358	0,720	
Марка 4	0,360	0,609	0,705	
Марка 5	0,326	0,691	0,790	
Опора 1	0,835	0,974	0,931	
Опора 2	0,887	0,962	0,894	

З таблиці бачимо, що для рівня значущості $p=0,05$ і $n=71$, маємо $v < v_p$ для п'яти марок на трубопроводі. Тобто гіпотеза про постійність центру групування результатів спостережень відкидається. Отже мало місце зміщення деформаційних марок впродовж періоду спостережень. Для деформаційних марок на опорах 1 і 2, а також для контрольної точки $v > v_p$, що свідчить про їх стабільність.

Як вже зазначалося, під час спостережень координатні осі були розташовані так, що вісь абсцис спрямовувалась уздовж напрямку на контрольну точку, тобто під певним кутом до осі трубопроводу. Для спрощення процесу опрацювання даних та покращення наочності графічно відображених результатів було прийнято рішення змінити положення

координатних осей. Їх встановили так, щоб абсциса була паралельна осі трубопроводу. Для цього було використано матрицю повороту в тривимірному просторі навколо осі OZ :

$$\mathbf{M}_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Поворот здійснювався множенням матриці повороту на вектор, що описує точку [53]:

$$\vec{\mathbf{p}}' = \mathbf{M}_Z(\theta) \cdot \vec{\mathbf{p}}. \quad (2.29)$$

У даному випадку вектор, який описує точку, – це координати точок, отримані в результаті спостережень:

$$\vec{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ H \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

Потрібний кут повороту координатних осей θ отримуємо з рівняння трубопроводу (рис. 2.6). Для запису канонічного рівняння прямої (рівняння трубопроводу) використано координати плівкових відбивачів 1 і 5 (табл. 2.4), отриманих у першому циклі спостережень, що розташовані на одній твірній.

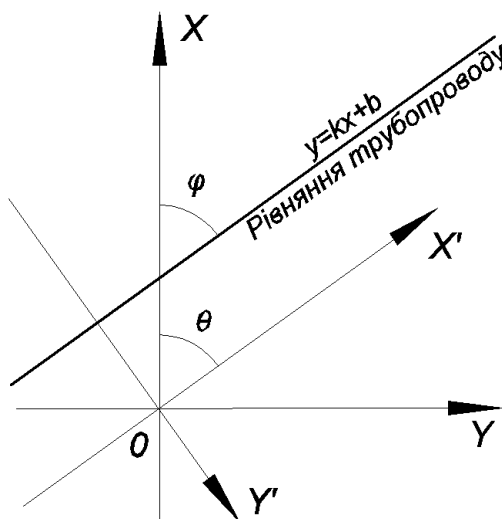


Рис. 2.6 Схема повороту координатних осей

Таблиця 2.4

Координати плівкових відбивачів

Координати	Плівковий відбивач 1	Плівковий відбивач 5
X	162,514	123,692
Y	108,214	39,65

Загальний вигляд канонічного рівняння прямої:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (2.31)$$

Підставимо в (2.31) значення координат плівкових відбивачів 1 і 5 (табл.2.4):

$$\frac{x - 162,514}{-38,822} = \frac{y - 108,214}{-68,564}.$$

Переходячи від канонічного рівняння до рівняння типу лінійної функції $y = k \cdot x + b$, рівняння трубопроводу запишемо так:

$$y = 1,7661 \cdot x - 178,8039. \quad (2.32)$$

Коефіцієнт k є кутовою величиною, що визначає нахил прямої до осі OX :

$$k = \operatorname{tg} \varphi.$$

З рис. 2.6 видно, що кут φ відповідає потрібному куту повороту координатних осей:

$$k = \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \theta,$$

$$\theta = \operatorname{arctg}(k) = \operatorname{arctg}(1,7661) = 60^\circ 28' 50''.$$

Після повороту координатних осей на кут $\theta = 60^\circ 28' 50''$, температурні зміщення надземного переходу газопроводу визначалися за різницею відповідної координати в i -му і першому циклах. Різниця координат X показувала поздовжні зміщення газопроводу; різниця координат Y – поперечні зміщення; різниця координат Z – зміщення з висотою.

Графічне відтворення результатів. За період спостереження зміщення трубопроводу вздовж координати Z не перевищувало 2 мм, що вказує на стійкість конструкції у висотному положенні. Зміна координати Z на 2 мм в основному викликана похибками визначення координат деформаційних марок.

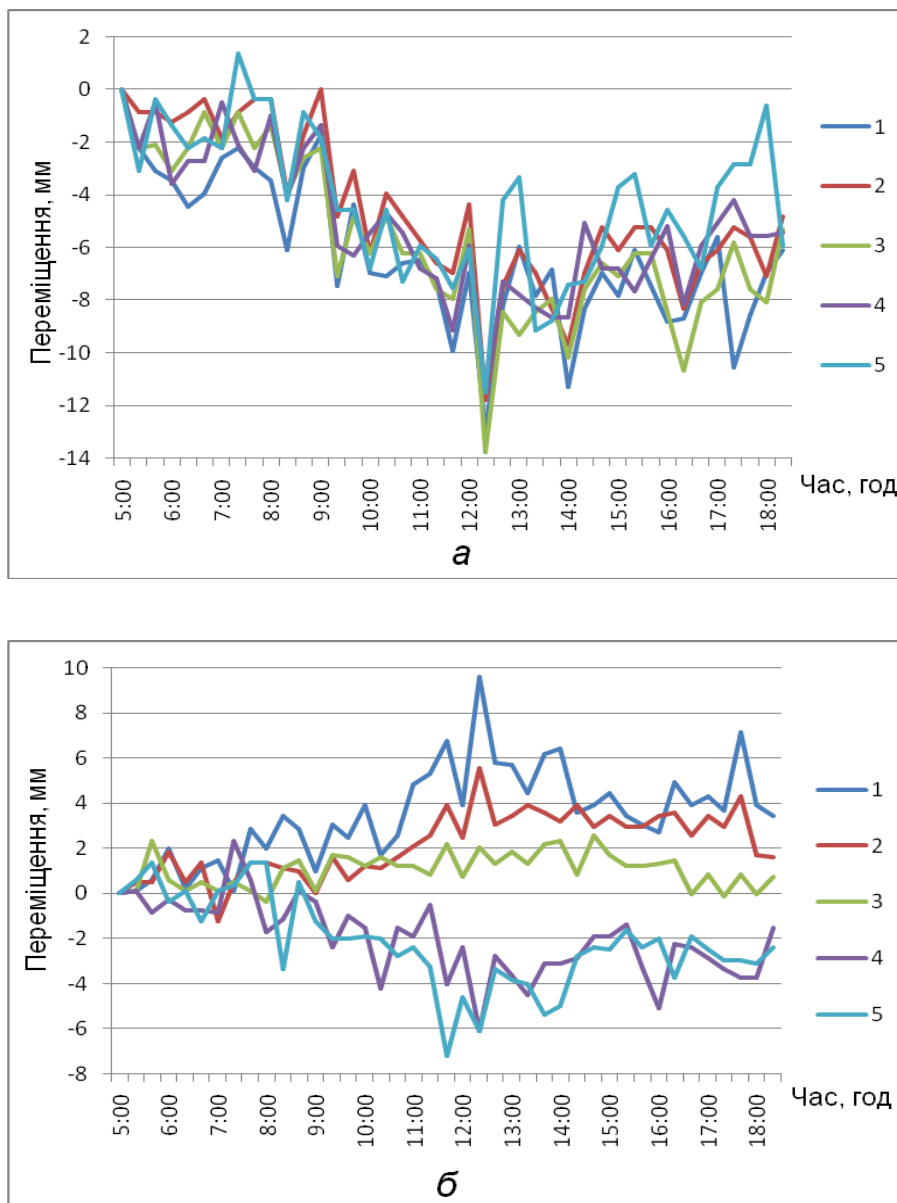


Рис. 2.7 Графіки добових переміщень газопроводу в поздовжньому(а) і поперечному (б) напрямках

На рис. 2.7 представлені графіки поздовжніх і поперечних зміщень газопроводу, визначені при наведенні на відбиваючі плівки. Отримані графічні результати дозволяють чітко прослідкувати закономірність зміщення трубопроводу при зміні температури. Максимум температурних переміщень припадає на період підвищення температури повітря до $37,5^{\circ}\text{C}$. З графіків бачимо, що амплітуда добових переміщень газопроводу в поперечному напрямку досягає 10 мм; в поздовжньому – 14 мм.

2.2.2. Кореляційний аналіз температурних переміщень надземних трубопроводів

Циклічні температурні переміщення надземних трубопроводів виникають внаслідок їх видовження, викликаного зміною температурного режиму атмосфери. Якщо температуру повітря над окремими ділянками надземних переходів протяжністю 100-200 м можна приймати постійною, то односторонній нагрів труби сонячними променями порушує цю закономірність і спричинює розвиток температурних деформацій металу. Різниця температури поверхні труби на сонячній і тіньовій сторонах створює додаткові напруження в трубопроводі [85, 90], результатом дії яких є зміщення труби в горизонтальній площині.

Фактор теплового впливу на надземні переходи трубопроводів має нестабільний і випадковий характер. Теплові процеси, викликані впливом сонячної радіації та швидкістю передавання тепла від навколишнього середовища трубі, не дають змоги визначити її температуру теоретичним шляхом. У праці [65] наведені результати експериментальних досліджень залежності між температурою атмосферного повітря та деформаціями газопроводів.

У дослідженні [107] встановлено, що зміна координат пунктів на багатоповерхових будівлях корелює з денним ходом температури і радіації. Пряма сонячна радіація є важливим фактором короткоперіодичної динаміки геодезичних пунктів на високих спорудах протягом дня. Питання інтенсивності впливу сонячної радіації залежно від напрямку дії та сили на температурну складову крену висотних споруд і його азимут викладено в працях [9, 21]. Одним з основних напрямків дослідження деформацій інженерних споруд є встановлення залежності між зміщеннями і випадковими факторами, що на них впливають [118]. Для встановлення таких залежностей найчастіше користуються методами математичної статистики [13, 25, 26].

За результатами досліджень залежності між температурою атмосферного повітря та переміщеннями надземного газопроводу [65] встановлено, що під дією температурних впливів трубопровід змінює своє положення в повздовжньому та поперечному напрямках. Зміщення труби у вертикальній площині не були зафіксовані. Так як на обґрунтування точності геодезичних спостережень повздовжні зміщення не впливають, проводились дослідження поперечних зміщень трубопроводу під дією факторів теплового впливу.

Досліджено поперечні зміщення S опорного перерізу надземного переходу магістрального газопроводу “Уренгой – Помари – Ужгород” методом кореляційного аналізу [63]. Діаметр досліджуваної ділянки труби – 1420 мм. Трубопроводи таких діаметрів найбільш поширені в карпатському регіоні, як переходи через штучні та природні перешкоди. Під час спостережень фіксувалися такі параметри: температура повітря t , різниця температур труби з сонячного і тіньового боків ΔT у межах перерізу та зміщення S (методику спостережень описано у [65]). Температура поверхні труби визначалася за допомогою портативного пірометра (рис. 2.8) з точністю до 0,1 °С. Упродовж 13-ти годин проведено 41 цикл спостережень. Температура повітря змінювалася від 13-ти до 37 °С. Аналіз виконано на основі усереднених даних для одного опорного перерізу (табл. 2.5).



Рис. 2.8 Загальний вигляд пірометра Laserliner ThermoSpot

Таблиця 2.5

Результати спостережень у межах опорного перерізу

Номер циклу	Поперечні зміщення (абсолютні) S , мм	Температура повітря, °C	Різниця температур	Відхилення		
				$S-M[S]$	$t-M[t]$	$\Delta T-M[\Delta T]$
1	0	13,0	8,7	-3,44	-14,41	-2,58
2	0	13,5	8,9	-3,44	-13,91	-2,44
3	1	13,0	8,7	-2,44	-14,41	-2,58
4	2	14,0	9,0	-1,44	-13,41	-2,31
5	2	16,0	9,5	-1,44	-11,41	-1,83
6	0	19,0	10,1	-3,44	-8,41	-1,21
7	1	23,0	10,8	-2,44	-4,41	-0,51
8	1	24,0	10,9	-2,44	-3,41	-0,36
9	0	22,5	10,7	-3,44	-4,91	-0,59
10	3	26,5	11,3	-0,44	-0,91	0,00
11	2	26,5	11,3	-1,44	-0,91	0,00
12	3	26,5	11,3	-0,44	-0,91	0,00
13	3	24,5	11,0	-0,44	-2,91	-0,28
14	1	24,5	11,0	-2,44	-2,91	-0,28
15	3	26,5	11,3	-0,44	-0,91	0,00
16	2	27,0	11,4	-1,44	-0,41	0,07
17	4	28,5	11,6	0,56	1,09	0,27
18	2	27,0	11,4	-1,44	-0,41	0,07
19	3	28,5	11,8	-0,44	3,09	0,51
20	5	33,0	12,1	1,56	5,59	0,80
21	5	34,0	12,2	1,56	6,59	0,91
22	7	34,5	12,3	3,56	7,09	0,96
23	4	37,0	12,5	0,56	9,59	1,21
24	10	34,0	12,2	6,56	6,59	0,91
25	6	34,0	12,2	2,56	6,59	0,91
26	6	33,5	12,2	2,56	6,09	0,85
27	4	33,0	12,1	0,56	5,59	0,80
28	6	34,0	12,2	2,56	6,59	0,91
29	6	33,0	12,1	2,56	5,59	0,80

Продовження табл. 2.5

30	4	31,0	11,9	0,56	3,59	0,57
31	4	34,5	12,3	0,56	7,09	0,96
32	4	29,0	11,6	0,56	1,59	0,33
33	3	31,0	11,9	-0,44	3,59	0,57
34	3	29,5	11,7	-0,44	2,09	0,39
35	3	30,5	11,8	-0,44	3,09	0,51
36	5	30,0	11,8	1,56	2,59	0,45
37	4	27,5	11,4	0,56	0,09	0,14
38	4	27,5	11,4	0,56	0,09	0,14
39	4	32,5	12,0	0,56	5,09	0,74
40	7	30,0	11,8	3,56	2,59	0,45
41	4	25,0	11,1	0,56	-2,41	-0,21
[M]	3,44	27,41	11,31			

У загальному вигляді результати спостережень представимо числами x_{ki} . Перший індекс означає номер випадкової величини, другий – цикл спостережень. Отже, x_{ki} – це значення випадкової величини x_k в i -му циклі.

Основними характеристиками випадкових величин x_i є математичне очікування $M[x_k]$, дисперсія Dx_k і кореляційні моменти K_{ki} .

$$\mathbf{K} = \{K_{ki}\}. \quad (2.33)$$

Математичне очікування, дисперсію і кореляційні моменти визначимо за відомими формулами [28]

$$Mx_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ki}; \quad (2.34)$$

$$Dx_k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ki} - M[x_k])^2; \quad (2.35)$$

$$K_{ki} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ki} - M[x_k])(x_{ii} - M[x_i]), \quad (2.36)$$

де n – кількість циклів спостережень. Розділивши значення коваріаційної матриці (2.36) на добуток відповідних середніх квадратичних похибок $m_k = \sqrt{D_k}$ і $m_i = \sqrt{D_i}$, отримаємо кореляційну матрицю:

$$\rho = \{\rho_{ij}\}. \quad (2.37)$$

За формулами (2.34)-(2.36) обчислимо елементи коваріаційної та кореляційної матриці:

$$[\mathbf{K}_{ki}] = \begin{pmatrix} 4,70 & 10,55 & 1,59 \\ 10,55 & 41,51 & 6,54 \\ 1,59 & 6,54 & 1,05 \end{pmatrix} \quad [\rho_{ij}] = \begin{pmatrix} 1,00 & 0,76 & 0,71 \\ 0,76 & 1,00 & 0,99 \\ 0,71 & 0,99 & 1,00 \end{pmatrix}.$$

Парні коефіцієнти кореляції ρ характеризують зв'язок між випадковими факторами без врахування інших. Кореляційний зв'язок буде значущий, якщо виконуються умови:

$$\rho \geq 3\sigma_{\rho}, \quad (2.38)$$

$$\text{де } \sigma_{\rho} = \frac{1-\rho^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (2.39)$$

Часткові коефіцієнти кореляції характеризують взаємозв'язок між двома змінними та постійному впливі третьої:

$$\rho_{12,3} = A_{12}/\sqrt{A_{11}A_{22}}, \quad \rho_{13,2} = A_{13}/\sqrt{A_{11}A_{33}}, \quad \rho_{23,1} = A_{23}/\sqrt{A_{22}A_{33}}, \quad (2.40)$$

де $A_{11}, A_{22}, \dots, A_{ij}$ – визначники другого порядку, які знаходять з матриці (2.37). Використовуючи кореляційну матрицю і формули (2.40), обчислимо визначник A_{ij} та часткові коефіцієнти кореляції. Характер зв'язку між двома факторами та постійному третьому перевіримо за умовою (2.38). Результати зведемо в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Парні та часткові коефіцієнти кореляції			
Параметр	Кореляція між		
	<i>S i t</i>	<i>S i ΔT</i>	<i>t i ΔT</i>
<i>Парна</i>			
ρ	0,76	0,71	0,99
σ_{ρ}	0,07	0,08	0,003
$3\sigma_{\rho}$	0,2	0,24	0,01
<i>Часткова</i>			
ρ	0,47	0,34	0,98
σ_{ρ}	0,12	0,14	0,01
$3\sigma_{\rho}$	0,37	0,42	0,02

Силу впливу одночасно декількох факторів на залежну змінну характеризує коефіцієнт множинної кореляції:

$$R_{1,23} = \sqrt{1 - \frac{A}{A_{11}}}, \quad (2.41)$$

де A – визначник третього порядку матриці (2.37).

Множинні коефіцієнти кореляції без врахування дії одного з факторів визначимо за формулами

$$R_{1,2} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{1,23}^2}{1 - \rho_{13,2}^2}}; \quad R_{1,3} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{1,23}^2}{1 - \rho_{12,3}^2}}. \quad (2.42)$$

Перевірку значущості коефіцієнтів кореляції, а отже і лінійної регресії виконаємо за критерієм Фішера [28]:

$$F_\phi = \frac{R_{1,23}^2(n-m)}{(1-R_i^2)(m-1)} \geq F_q, \quad (2.43)$$

де $n=41$ – кількість циклів спостережень; $m=3$ – кількість параметрів.

Дана перевірка є важливою для регресійного аналізу і по суті є окремим випадком перевірки обмежень. В даному випадку нульова гіпотеза – це одночасна рівність нулю усіх коефіцієнтів при факторах регресійної моделі. Відповідно якщо значення F_ϕ більше граничного значення для заданого рівня значущості, то нульова гіпотеза відкидається, що свідчить про статистичну значущість регресії. В іншому випадку модель визнається незначущою.

Прийнявши рівень значущості 0,05 для кількості ступенів свободи $f_1=38$ і $f_2=2$, знаходимо F_q . Значення коефіцієнтів R_i вважаються достовірними у випадку виконання умови (2.43). За результати обчислень, зведених в табл. 2.7, підтверджується значущість регресії.

Таблиця 2.7

Множинна кореляція та статистична оцінка вибірових коефіцієнтів

Параметр	Кореляція		
	загальна	без t	без ΔT
R	0,79	0,71	0,76
F_ϕ	31,55	23,91	28,07
F_q	19,43	19,43	19,43

Рівняння множинної регресії має вигляд:

$$\tilde{S} = S_0 + b_2 t + b_3 \Delta T. \quad (2.44)$$

Використовуюючи матрицю (2.33), знайдемо визначники другого порядку B_{11} , B_{12} , B_{13} та коефіцієнти регресії:

$$b_2 = B_{12}/B_{11}; \quad b_3 = B_{13}/B_{11}. \quad (2.45)$$

Вільний параметр рівняння S_0 знаходимо за формулою

$$S_0 = M[x_1] - b_2 M[x_2] - b_3 M[x_3], \quad (2.46)$$

де $M[x_i]$ – математичне очікування випадкових факторів.

У результаті обчислень отримані такі значення коефіцієнтів регресії: $S_0=18,79$, $b_2=0,76$, $b_3=-3,19$. Тоді рівняння залежності поперечних зміщень досліджуваного перерізу трубопроводу від факторів, введених в аналіз, матиме вигляд:

$$\tilde{S} = 18,79 + 0,76t - 3,19\Delta T.$$

На основі проведеного аналізу встановлено, що на 62% ($R^2=0,62$) добові температурні переміщення надземного трубопроводу залежить від факторів, введених в аналіз. З аналізу коефіцієнтів кореляції бачимо, що зв'язок між S і t та S і ΔT майже однаковий. Підвищення температури повітря приводить до збільшення величини зміщення, оскільки коефіцієнт парної ($\rho_{St}=0,76$) і часткової ($\rho_{St,\Delta T}=0,47$) кореляції відмінні від нуля і мають додатне значення. Окрім цього підвищення температури повітря веде до збільшення різниці температури труби на сонячній і тіньовій сторонах. Але цей фактор в меншій мірі впливає на зміщення трубопроводу ($\rho_{SAT}=0,71$; $\rho_{SAT,t}=0,34$).

Що стосується універсальності моделі, то тут є значні обмеження в застосуванні. Значення коефіцієнта b_1 в рівнянні регресії буде залежати від розташування вибраного перерізу на трубопроводі, схеми прокладання надземного переходу, наявності компенсаторів, проміжних заземлених опор. Значною мірою на значення коефіцієнта b_2 буде впливати температура газу, який транспортується. Вона буде змінюватись в залежності від віддалі до найближчої компресорної станції. Коефіцієнт b_3 змінюється в залежності від умов теплообміну системи “трубопровід – докілья”. Визначальним у цій системі є коефіцієнт поглинання трубопроводу, який визначається в основному кольором його поверхні.

2.2.3 Динамічна модель процесу горизонтальних переміщень надземного трубопроводу

2.2.3.1 Побудова динамічної моделі

Теорія динамічних систем, яка виникла з теорії автоматичного управління, успішно застосовується в різних галузях науки і техніки. Однією з переваг математичних моделей динамічних систем є врахування інерційної затримки споруди при відображенні природних властивостей перетворення вхідних даних в реакцію системи [36].

Розглянемо систему “споруда-навколишнє середовище” у вигляді динамічної системи. В попередньому розділі встановлено, що основними факторами, які впливають на горизонтальні переміщення трубопроводу є температура повітря і нерівномірний боковий нагрів труби сонячними променями. Ці фактори є вхідними даними динамічної системи. Реакцією системи, або вихідними змінними є переміщення трубопроводу.

Динамічна модель процесу деформацій містить три основні складові, за допомогою яких складають прогноз розвитку деформацій [94]. Перша складова відображає динамічні властивості системи “споруда-навколишнє середовище”; друга – долю переміщень, які виникають під впливом основних вхідних впливів; третя складова – включає переміщення, що виникають в результаті дії неврахованих факторів (шумова компонента).

Диференціальні і рекурентні рівняння встановлюють відповідність між вхідними впливами і вихідними змінними. Введемо позначення цих процесів:

S_k – горизонтальні переміщення трубопроводу;

t_k – температура повітря;

ΔT_k – градієнт температури поверхні труби між сонячною і тіньовою сторонами;

k – номер циклу спостережень.

З врахуванням цих позначень, запишемо модель процесу горизонтальних зміщень трубопроводу S_k в рекурентній формі на основі рівняння 1-го порядку [36]:

$$S_k = \varphi S_{k-1} + \beta_1 t_k + \beta_2 \Delta T_k, \quad (2.47)$$

де φ - коефіцієнт динаміки, β_1, β_2 – коефіцієнти, які відображають ступінь впливу вхідних факторів на переміщення трубопроводу.

Побудову моделі починаємо з оцінки параметрів $\varphi, \beta_1, \beta_2$ на основі результатів добових спостережень за входом $t_k, \Delta T_k$ і виходом S_k . Для цього знаходимо мінімум функції:

$$F(\varphi, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N (S_k - \hat{S}_{k/k-1})^2,$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \varphi} &= -2 \sum_{k=2}^N (S_k - \hat{\varphi} S_{k-1} - \hat{\beta}_1 t_k - \hat{\beta}_2 \Delta T_k) \cdot S_{k-1} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \beta_1} &= -2 \sum_{k=2}^N (S_k - \hat{\varphi} S_{k-1} - \hat{\beta}_1 t_k - \hat{\beta}_2 \Delta T_k) \cdot t_k = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \beta_2} &= -2 \sum_{k=2}^N (S_k - \hat{\varphi} S_{k-1} - \hat{\beta}_1 t_k - \hat{\beta}_2 \Delta T_k) \cdot \Delta T_k = 0 \end{aligned} \right\}$$

В результаті отримаємо систему нормальних рівнянь для обчислення параметрів $\varphi, \beta_1, \beta_2$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N S_{k-1}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=1}^N S_{k-1} t_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=1}^N S_{k-1} \Delta T_k - \sum_{k=1}^N S_k S_{k-1} &= 0 \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N S_{k-1} t_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=1}^N t_k^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=1}^N t_k \Delta T_k - \sum_{k=1}^N S_k t_k &= 0 \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N S_{k-1} \Delta T_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=1}^N t_k \Delta T_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=1}^N \Delta T_k^2 - \sum_{k=1}^N S_k \Delta T_k &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

В даній системі нормальних рівнянь оцінку невідомих параметрів слід виконувати за центрованими значеннями входу і виходу. Для цього не змінюють структуру системи нормальних рівнянь, а замінюють $S_k, t_k, \Delta T_k$ їх центрованими значеннями:

$$\overset{\circ}{S}_k = S_k - \bar{S} \quad \overset{\circ}{t}_k = t_k - \bar{t} \quad \overset{\circ}{\Delta T}_k = \Delta T_k - \Delta \bar{T},$$

де $\bar{S}, \bar{t}, \bar{\Delta T}$ – середнє арифметичне значення. Розв'язавши систему рівнянь, і підставивши невідомі параметри в (2.47), отримаємо модель короткоперіодичного характеру розвитку процесу горизонтальних зміщень трубопроводу:

$$S_k = 0,04S_{k-1} + 0,38t_k + 0,15\Delta T_k, \quad (2.49)$$

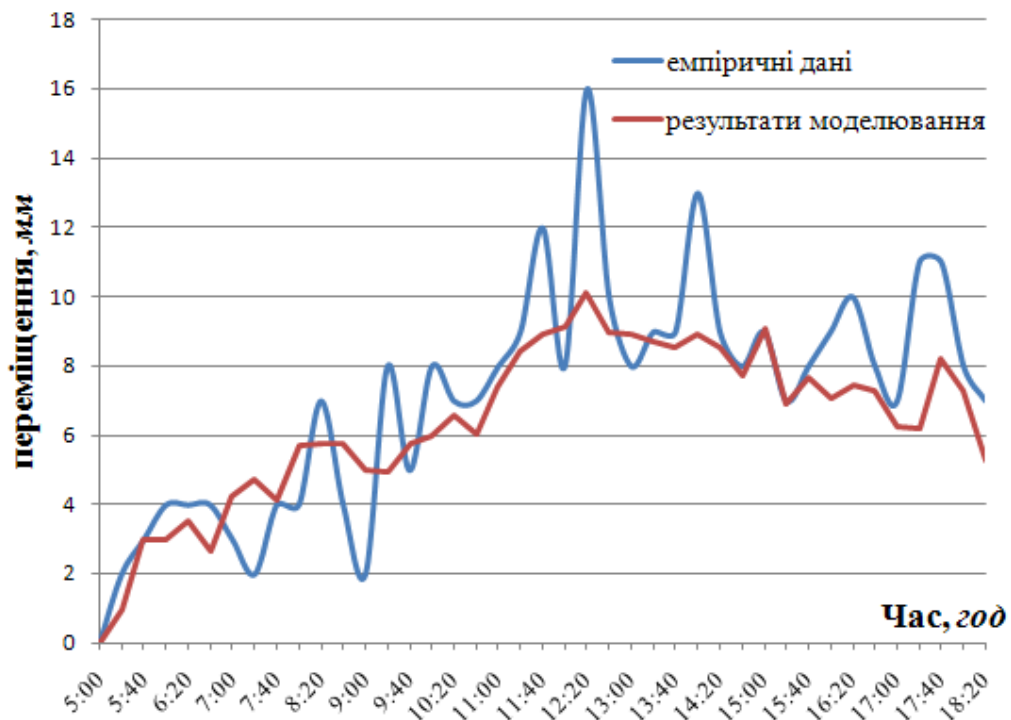


Рис. 2.9 Результати моделювання короткоперіодичних горизонтальних зміщень трубопроводу

Виконавши оцінку точності обчислених параметрів, отримано наступні значення: $m_\varphi = 0,01$; $m_{\beta_1} = 0,01$; $m_{\beta_2} = 0,02$.

2.2.3.2 Вплив високочастотних коливань на точність визначення горизонтальних переміщень трубопроводу

Під впливом добових температурних коливань повітря і нагрівання трубопроводу сонячними променями виникає реакція у вигляді короткоперіодичних зміщень труби. При визначенні планового положення трубопроводу, значний вплив на точність вимірів створюватимуть високочастотні коливання, викликані змінами температури впродовж доби.

Їх величина може перевищувати похибки безпосередніх вимірів. З метою правильної організації геодезичних спостережень, необхідно забезпечити виконання умови:

$$m_{xy0} \leq m_{xy}, \quad (2.50)$$

де m_{xy} – СКП геодезичних спостережень за плановим положенням трубопроводу; m_{xy0} – СКП, яка характеризує діапазон можливих високочастотних коливань.

В монографії [36], на основі апарату частотних характеристик динамічної системи, отримано рівняння, яке встановлює зв'язок між середніми квадратичними похибками входу і виходу для динамічної системи. Запишемо рівняння зв'язку для двох вхідних параметрів:

$$m_{xy0} = \sqrt{\frac{\beta_1^2 m_t^2 + \beta_2^2 m_{\Delta T}^2}{1 + 2\varphi \cos \omega\tau + \varphi^2}}, \quad (2.51)$$

де параметри φ , β_1 , β_2 отримані за результатами моделювання (2.49); m_t , $m_{\Delta T}$ – СКП зміни амплітуди температури повітря і градієнту температури поверхні труби; $\omega\tau = \frac{\pi}{12} \cdot 0,3 = 4,5^\circ$, оскільки для прогнозу використана половина гармоніки високочастотних коливань (12 год) з кроком дискретизації 20 хв. Похибки m_t , $m_{\Delta T}$ отримаємо за формулами

$$m_t = \sqrt{\sigma_t^2 + m_{t_{\text{вим}}}^2}, \quad m_{\Delta T} = \sqrt{\sigma_{\Delta T}^2 + m_{\Delta T_{\text{вим}}}^2},$$

де $\sigma_t^2, \sigma_{\Delta T}^2$ – дисперсії коливань температури, $m_{t_{\text{вим}}} = \pm 1^\circ\text{C}$ – похибка вимірювання температури повітря, $m_{\Delta T_{\text{вим}}} = \pm 0,1^\circ\text{C}$ – похибка вимірювання температури поверхні труби.

Підставимо в формулу (2.51) значення параметрів моделі (2.49), та обчислені похибки m_t і $m_{\Delta T}$. В результаті отримаємо:

$$m_{xy0} = \sqrt{\frac{\beta_1^2 m_t^2 + \beta_2^2 m_{\Delta T}^2}{1 + 2\varphi \cos \omega\tau + \varphi^2}} = \sqrt{\frac{0,38^2 \cdot 42,5 + 0,15^2 \cdot 1,11}{1 + 2 \cdot 0,04 \cdot \cos 4,5^\circ + 0,04^2}} = \sqrt{\frac{6,16}{1,081}} = 2,4 \text{ мм}.$$

Отриманий результат вказує на те, що горизонтальні зміщення осі трубопроводу, величина яких визначається в процесі геодезичного контролю, піддаються відчутним високочастотним температурним коливанням.

У випадках, коли необхідно призначити максимально високу точність геодезичних спостережень за плановими зміщеннями осі трубопроводу, яка характеризується середньою квадратичною похибкою m_{xy} , забезпечення виконання умови $m_{xy} > m_{xy0}=2,4$ мм, дасть змогу знехтувати дисперсією високочастотних коливань, викликаних температурними деформаціями.

2.3 Висновки до розділу 2

Залежність допустимого вертикального зміщення опор надземних трубопроводів від ряду факторів (віддалі між опорами, робочого тиску, товщини стінки труби, границі плинності матеріалу трубопроводу), вимагає диференційованого підходу до встановлення точності геодезичних робіт для кожного надземного трубопроводу.

Запропоновано формулу для розрахунку СКП осідання опори в будь-який момент експлуатації трубопроводу, з врахуванням його просторової конфігурації.

Експериментально підтверджено вплив температури навколишнього середовища на положення трубопроводу. Встановлено, що амплітуда зміщення осі трубопроводу впродовж доби може досягати 10 мм у поперечному напрямку і 14 мм – у поздовжньому. Відсутність зміни висотного положення трубопроводу та його опор в період спостережень свідчить про їх стабільність під дією факторів термічного впливу.

Правильним методичним прийомом під час проведення геодезичного контролю за положенням осі трубопроводу є виконання спостережень в однакові періоди доби. При цьому високочастотні коливання будуть фіксуватися на одному рівні їх амплітуди, або в одній із кульмінацій. Для довільного вибору моментів спостережень відносно високочастотних коливань, необхідно призначити точність визначення планового положення не вище 2,4 мм. Призначення точності за таким принципом можна виконувати за умови, якщо величина похибки $m_{xy}=2,4$ мм не створює суттєвого впливу на оцінку стану конструкції.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЗА СТАНОМ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ ГАЗОПРОВОДІВ

Геодезичні методи обстеження надземних переходів магістральних газопроводів дають змогу визначати просторове положення конструктивних елементів переходів та їх зміну в часі [91, 102]. Відхилення від проектного положення опор, пілонів, осі трубопроводу приводить до підвищення напружено-деформованого стану елементів конструкції [47], що може привести до аварійних ситуацій. Використання сучасних геодезичних методів із застосуванням електронних тахеометрів [93, 121], цифрових нівелірів [19, 71], наземних лазерних сканерів [147, 151] дає можливість визначати просторові переміщення інженерних об'єктів з високою точністю та в найкоротші терміни. Проте використання запропонованих приладів та методів для визначення положення трубопроводу вимагають встановлення відбивача або рейки на поверхні газогону, що створює небезпеку для виконавців. Сучасні електронні тахеометри дають можливість виконувати спостереження у безрефлекторному режимі. В багатьох наукових працях описано дослідження та приведені рекомендації щодо використання електронних тахеометрів у безрефлекторному режимі. Постійно розробляються нові та удосконалюються існуючі методики для виконання різноманітних інженерно-геодезичних задач [40, 83, 104, 140].

Використання безрефлекторного режиму вимірювання віддалі надає ряд переваг, до яких можна зарахувати: безпеку виконавця (проведення безконтактних вимірів), скорочення часу на проведення спостережень, доступ до практично всіх елементів конструкцій. При цьому для різних віддалей та кутів падіння променя точність безрефлекторного режиму може істотно змінюватись [131, 138]. Тому актуальним є питання не лише дослідження безрефлекторного режиму вимірювання для спостереження за зміщеннями трубопроводу, але й розробка методів для підвищення точності отриманих результатів.

3.1. Геодезична основа для моніторингу просторового положення надземних переходів газопроводів

3.1.1. Проектування вихідної планово-висотної основи

Схеми побудови опорної основи

Осідання опор трубопроводу, його зміщення в плані і з висотою визначають відносно пунктів опорної планово-висотної основи. Їх розміщують на стійких, в геологічному відношенні, і незатоплюваних територіях.

Для забезпечення необхідної точності, створюють додаткові пункти робочої основи. Їх розташовують вздовж осі трубопроводу. Найбільш перспективним для визначення координат пунктів робочої основи електронним тахеометром є метод вільної станції. Координати станції визначаються зворотною засічкою мінімум з трьох пунктів опорної планово-висотної основи. А для підвищення точності просторового положення станції, їх число рекомендується збільшити до чотирьох [128]. Окрім цього створення чотирьох пунктів опорної мережі виконується на випадок можливої втрати стійкості одного з пунктів [56].

Таким чином, для контролю положення елементів надземного трубопроводу доцільно створити опорну мережу у вигляді геодезичного чотирикутника (по два пункти на кожному березі, рис. 3.1, *a*). Місця та кількість запроєктованих пунктів визначаються в залежності від довжини надземного переходу і рельєфу місцевості. Так для переходів великої довжини, досягнути підвищення точності мережі та зручності виконання вимірювань можна завдяки додатково запроєктованому пункту, розташованому ближче до середини переходу (рис. 3.1, *б*). Найвища точність визначення координат досягається у тому випадку, коли вільна станція розташована симетрично відносно опорних пунктів. Відхід від цієї схеми розташування пунктів спричинює зростання похибки планових координат у 1,5 рази [11]. Не потрібно забувати про необхідність прямої видимості між пунктами робочої (вільна станція тахеометра) і опорної основи. Для

послаблення впливу рефракції на кутові і лінійні виміри, пункти проектують так, щоб висота візирного променя була якнайбільшою.

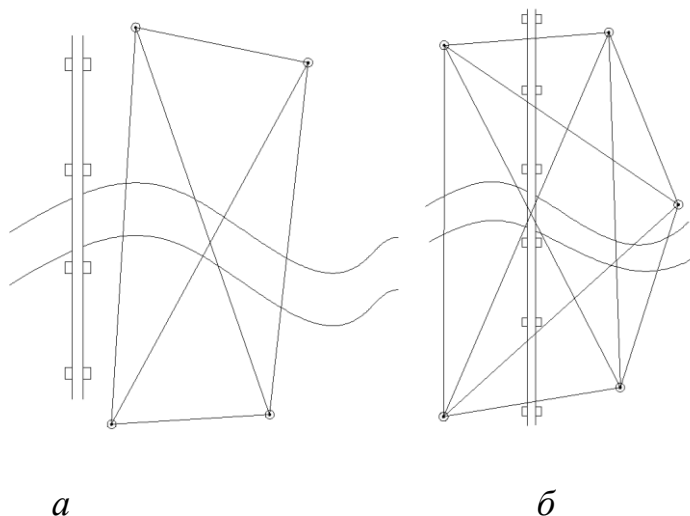


Рис. 3.1 Схеми побудови опорної планово-висотної основи

Стійкість знаків опорної основи у планово-висотному положенні.

При спостереженні за деформаціями інженерних об'єктів, важливе значення має стійкість планово-висотної основи. З цією метою періодично виконують комплекс високоточних вимірювань для оцінки стійкості мережі. Спостереження на пунктах можна виконувати двома методами: високоточні GNSS-спостереження або лінійно-кутові вимірювання [99]. Крім цього доцільно передбачити заходи щодо забезпечення стійкості знаків в планово-висотному положенні. Такий результат досягається шляхом вибору конструкції знаку. Головною умовою конструкції знаків геодезичної основи є їх стійкість проти дій сил морозного пучення. Наявність інших факторів, що порушують стійкість знаків [60, 111] (осідання в лесових ґрунтах, осідання карстового походження, осідання викликані зміною вологості ґрунтів) не розглядається, оскільки в таких умовах знак зміщується разом з шаром ґрунту, в який він закладений.

Для забезпечення стійкості знаку під дією сил морозного пучення необхідно враховувати такі основні вимоги [111]:

1. Для зменшення дії сил морозного пучення на знак, його частина, що розташована в шарі ґрунту, який промерзає, повинна мати якнайменшу

площу дотику з ґрунтом. Цього можна досягнути шляхом зменшення площі перерізу верхньої частини знаку, або її розташуванням нижче поверхні землі.

2. Нижня частина знаку, яка розташована в незамерзаючому шарі ґрунту, повинна мати достатні розміри, що зможуть забезпечити опір силам морозного пучення.

3. Наближений розрахунок конструкції знаку виконують за формулою [111]

$$\frac{r \cdot S_1 + Q}{p \cdot S_2} \geq k, \quad (3.1)$$

де r – величина питомої сили опору пучення ($r=0,08$ кг/см²); S_1 – площа поверхні частини знаку, яка розташована в незамерзаючому шарі (без врахування поверхні нижньої грані основи) в см², поверхня стінок реперної штанги враховується з коефіцієнтом $0,5$; Q – маса знаку в кг; p – величина питомої сили морозного пучення (у випадку розташування верхньої частини знаку на поверхні землі – $0,5$ кг/см², верхня частина знаку нижче поверхні землі на $1/5$ глибини промерзання ґрунту – $0,3$ кг/см², верхня частина знаку нижче поверхні землі на $1/3$ глибини промерзання ґрунту – $0,2$ кг/см²); S_2 – площа поверхні стінок знаку в ґрунті, що промерзає, в см²; k – коефіцієнт запасу стійкості знаку ($k=1$ для знаків в умовах постійного снігового покриву; $k=1,5-2,0$ для знаків в умовах змінного снігового покриву).

4. У зв'язку з тим, що стійкість знаку не залежить від глибини закладання відносно нижньої межі промерзання ґрунту, глибина закладання h відносно денної поверхні повинна визначатись за формулою

$$h = i + a + b, \quad (3.2)$$

де i – максимальна глибина промерзання ґрунту, a – висота якоря, b – запас, що визначається величиною можливої похибки встановлення глибини промерзання ґрунту.

Для уникнення вертикальних зміщень знаків, викликаних зміною вологості ґрунту, не рекомендується приймати глибину закладання меншою ніж $1,5$ м.

Таблиця 3.1

Розрахунок коефіцієнта запасу стійкості знака

Параметр	Розмір якоря центру типу 160	
	48×48×20 см	120×120×50 см
$S'_1, \text{см}^2$	5919	38175
$S''_1, \text{см}^2$	3000	3000
$S_1, \text{см}^2$	7419	39675
$S_2, \text{см}^2$	6000	6000
Густина бетону $\rho_{\text{бет}}, \text{кг/см}^3$	0,0021	
Об'єм $V, \text{см}^3$	79830	753750
Маса знака $Q, \text{кг}$	168	1583
Коефіцієнт запасу стійкості знака k	$k = \frac{r \cdot S_1 + Q}{p \cdot S_2} =$ $= \frac{0,08 \cdot 7419 + 168}{0,5 \cdot 6000} = 0,25 < 1,4$	$k = \frac{r \cdot S_1 + Q}{p \cdot S_2} =$ $= \frac{0,08 \cdot 39675 + 1583}{0,5 \cdot 6000} = 1,6 > 1,4$

Аналізуючи результати (табл. 3.1), можемо зробити висновок про те, що розміри якоря центру типу 160, які представлені на рис. 3.1, *a* не забезпечують стабільність у висотному положенні ($k < 1,4$). Умова (3.1) буде виконуватись у випадку збільшення розміру якоря (120×120×50 см). Використання центрів типу 160 з вищезазначеними розмірами бетонного якоря дозволить забезпечити стабільність опорної мережі у висотному положенні на рівні стандарту стійкості геодезичного знака $\sigma_y < 2-4$ мм [21].

Встановлено [111], що основною причиною горизонтальних зміщень марок геодезичних знаків є нахил внаслідок їх нерівномірного осідання, яке викликане нещільним приляганням основи якоря до дна котловану, а також нерівномірне осідання ґрунту в котловані. Найбільшого значення горизонтальні зміщення знаків досягають в перші місяці після закладання. Через 10-12 місяців положення марок в горизонтальній площині в значній мірі стабілізується. Горизонтальні зміщення марок трубчастих знаків з бетонними якорями, закладеними на глибину 1,8 м, коливаються в межах 2мм.

3.1.2. Особливості виду деформаційних марок для спостереження за зміщеннями надземних переходів газопроводів

Під час спостережень за просторовим положенням надземного переходу газопроводу користуються деформаційними марками, закріпленими на поверхні труби. За їх зміщеннями визначають величину деформації осі трубопроводу. Для моніторингу цього явища використовують електронні тахеометри. Вони мають кілька переваг. Однією з них є оперативність отримання даних під час наведення на деформаційні марки у безрефлекторному режимі роботи. До того ж немає необхідності встановлювати призмові відбивачі на поверхню газопроводу, а спостерігачеві переміщуватись по трубі, адже це часто може бути дуже небезпечно.

Діапазон безрефлекторного режиму роботи електронного тахеометра напряму залежить від властивостей поверхні, на яку ведеться спостереження. Такими властивостями є колір поверхні труби, її текстура, а також кут падіння променів на цю поверхню. Вимірювання у безрефлекторному режимі при наведенні на трубопровід описано в праці [59].

Практика доводить, що наведення на деформаційну марку під гострим кутом до поверхні труби обмежує діапазон роботи приладу в безрефлекторному режимі. Варто зазначити, що під час роботи відсутність сигналу викликана наведенням на перехрестя візирної марки чорного кольору, що має погані відбиваючі властивості. В ході проведених досліджень автором встановлено, що втрата сигналу і неможливість визначення віддалі виникає навіть при малому відхиленні візирного променя від нормалі до поверхні марки. Тому доцільно застосовувати такі деформаційні марки, форма яких не обмежує діапазон роботи приладу.

Для вирішення поставленої задачі та вибору виду деформаційної марки було проведено аналіз візирних марок, що використовуються для моніторингу та монтажу обладнання. Форми і конструкції марок надзвичайно різноманітні, це залежить від призначення та умов їх використання [22]. Як візирні марки використовують штрихи, бісектори, концентричні кола, ромби,

клини, перехрестя. Для контрастності зображення марки наносять чорним кольором на білому або жовтому фоні.

Відомо, що найвищу точність наведення забезпечують марки типу бісектора (рис. 3.3) [7].

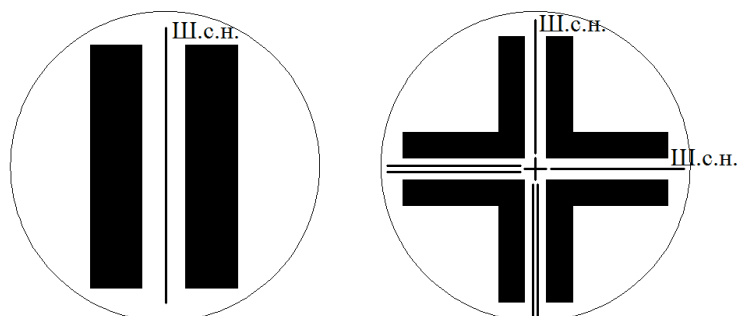


Рис.3.3 Форми марок з бісектором

Це пояснюється тим, що зображення лінії, на відміну від зображення точки, легше розпізнається оком людини (ноніальна гострота зору) [39]. Відносне суміщення двох прямих ліній сприймається оком людини, якщо кутова величина цього суміщення складає $10''$. Таким чином, ноніальна гострота зору приблизно в шість разів вища ніж звичайна, що характеризує роздільне сприйняття двох точок ($\approx 60''$). Зображення лінії, на відміну від зображення точки, охоплює не одну, а кілька колбочок (чутливих клітин ока) і тому легше розпізнається зоровою системою людини (рис. 3.4).

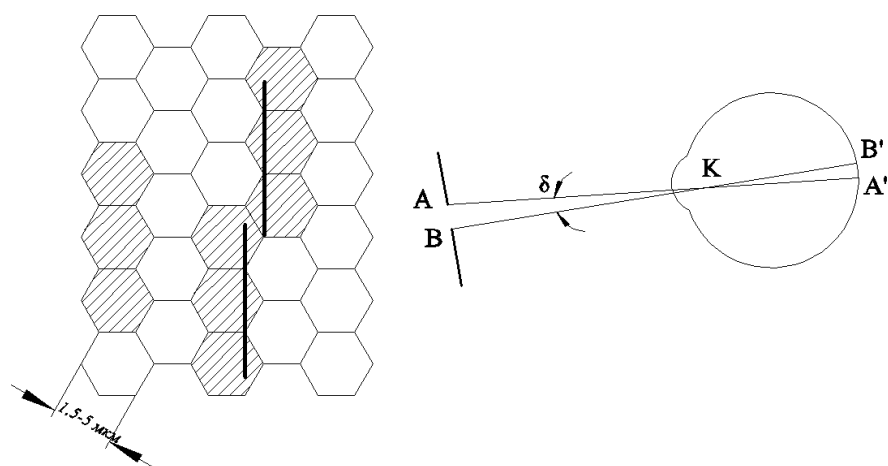


Рис. 3.4 Роздільна сила сітківки ока; ноніальна гострота зору (здатність розрізняти взаємне суміщення двох прямих ліній)

Наведення на деформаційні марки під гострим кутом до поверхні трубопроводу створює певні труднощі не лише для геодезичних приладів, а й для виконавця спостережень. Складність полягає в тому, щоб досягнути чіткого візування сітки ниток зорової труби в центрі марки. Актуальним завданням є вибір форми марки, яка дасть змогу виконувати візування під гострим кутом з високою точністю. Для цього необхідно дослідити, як змінюється точність наведення зі зміною кута візування, а також, як цю точність підвищити.

Завданням дослідження був вибір виду деформаційної марки, яка б не обмежувала дію безрефлекторного режиму тахеометра, розрахунок розмірів марки для різних довжин візирних променів та встановлення точності наведення на марки для різних віддалей та кутів візування.

Похибкою наведення називається неточне встановлення вертикальної нитки чи сітки бісектора на зображення предмета. Вона залежить від роздільної здатності ока, збільшення зорової труби, виду сітки ниток, форми і розміру об'єкта візування, загальних умов видимості.

Якщо прийняти, що наведення виконує спостерігач із середньою роздільною здатністю ока одним геодезичним приладом (збільшення зорової труби електронного тахеометра 26^X (Sokkia SET630), або більше (Sokkia SET530, 330, 230 та ін.); сітка ниток одного виду) і для задовільних умов видимості, то підвищити точність наведення можна шляхом правильного підбору форми та розміру марки.

Форма марки. Ділянка надземного трубопроводу довжиною L , в межах якої досліджувався безрефлекторний режим електронного тахеометра, характеризується горизонтальним граничним кутом $\beta_{\text{гран}}$ (рис. 3.5). Практикою встановлено [104], що значення граничного кута залежить від кольору і текстури поверхні труби. Наведення на центр деформаційної марки у формі перехрестя чорного кольору обмежує величину граничного кута, тому виникає необхідність застосування марки, центр якої незафарбований.

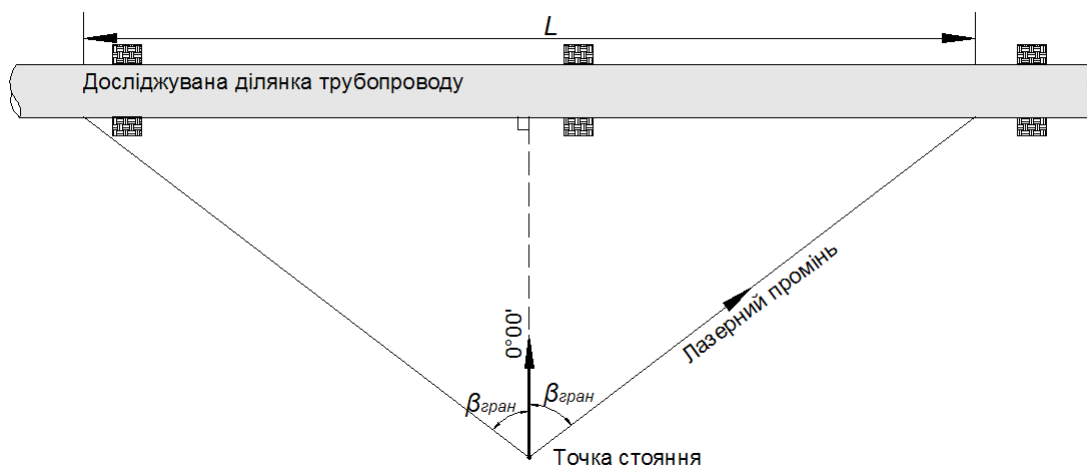


Рис. 3.5 Досліджувана ділянка трубопроводу в межах граничного кута

На думку автора [68], марка у формі бісектора (рис. 3.3) задовольняє вищевказані вимоги. Вона забезпечує найвищу точність наведення, а незафарбований центр марки не впливає на діапазон дії тахеометра.

Розмір марки повинен бути тим більший, чим більша віддаль наведення. На рис. 3.6 відображено залежність точності візування на марку з бісектором від розміру самого бісектора [51]. Розмір бісектора – це віддаль від штриха сітки до штриха бісектора, яку позначають через a . На рис. 3.6 на осі абсцис відкладено значення a в секундах, а на осі ординат – похибку візування труби зі збільшенням 24^X (також у секундах). Отже, можемо визначити дійсні розміри марки для різних віддалей візування.

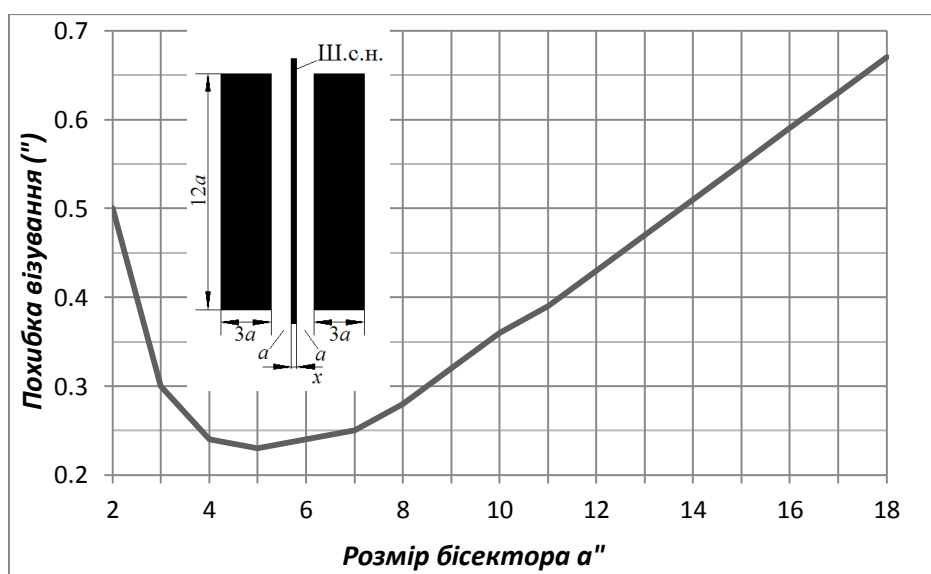


Рис. 3.6 Залежність точності візування від розміру бісектора

З рис. 3.6 видно, що найвища точність візування ($0,23''$) досягається при розмірі бісектора $a=5''$. Лінійні розміри величини a можна розрахувати за формулою

$$a_{\text{мм}} = \frac{a''}{\rho''} \cdot S_{\text{мм}}, \quad (3.4)$$

де S – візирна віддаль; $\rho = 206\,265''$.

Згідно з методикою, викладеною в праці [59], під час спостережень за зміщеннями надземних переходів магістральних газопроводів електронним тахеометром у безрефлекторному режимі вимірювань, довжина візирних ліній змінюється від 45 до 75 м (рис. 3.7).

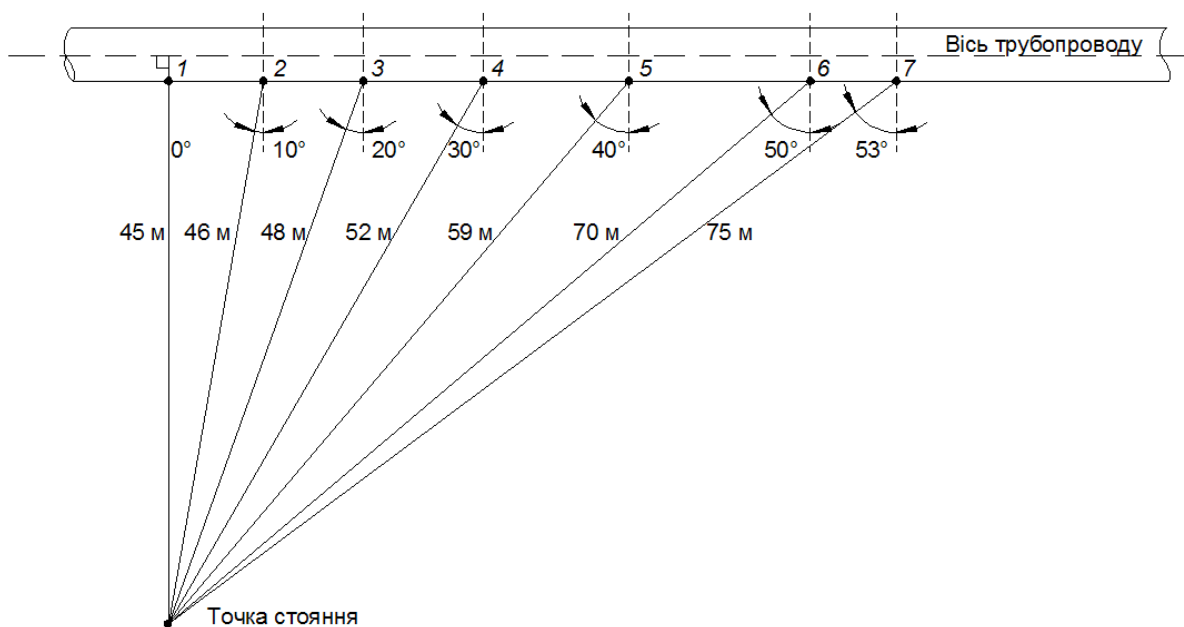


Рис. 3.7 Віддалі до деформаційних марок газопроводу

Розрахуємо необхідні розміри бісектора для кожної візирної віддалі за формулою (3.4). Обчислені значення наведені у табл. 3.2. Для розрахунку віддалі між бісекторами марки також зазначено ширину штриха сітки ниток зорової труби для різних віддалей.

Таблиця 3.2

Розміри візирної марки для наведення на різних віддальх

Показники	Номер марки						
	1	2	3	4	5	6	7
Довжина візирного променя S , м	45	46	48	52	59	70	75
Віддаль від штриха сітки до штриха бісектора a , мм	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	1,8
Ширина зображення сітки ниток x на віддалі S , мм	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
Віддаль між штрихами бісектора $a+a+x$, мм	2,8	2,9	3,0	3,3	3,7	4,4	4,7

Окрім того, що довжина візирної лінії збільшується для кожної наступної марки, кут, під яким візирний промінь падає на поверхню трубопроводу, а значить і на поверхню марки, змінюється від 0° для марки 1 до 53° для марки 7. При цьому віддаль між бісекторами буде зменшуватись (рис. 3.8).

Зменшення вибраної величини $a=5''$ приводить до збільшення похибки візування (див. рис. 3.5). Для компенсування впливу повороту площини марки до візирного променя збільшимо віддаль між штрихами бісектора пропорційно величині, що залежить від кута візування. Позначимо цю величину через δ . З трикутника ABC (рис. 3.8) легко встановити величину δ . Її знаходимо з відношення віддалі між штрихами бісектора марки і лінійною величиною видимої віддалі між штрихами:

$$\delta = \frac{1}{\cos \beta} . \quad (3.5)$$

Спотворення ширини бісектора в даній ситуації притаманні лише для вертикального бісектора марки. Вводимо поправку δ у його ширину. В результаті, марка для візування під різними кутами матиме однакову віддаль між горизонтальними бісекторами, а віддаль між вертикальними знайдемо з виразу:

$$A(\beta) = (a + a + x)\delta = \frac{a + a + x}{\cos \beta} . \quad (3.6)$$

Візування під прямим кутом ($\beta=0^\circ$)

Візування під кутом $\beta=45^\circ$

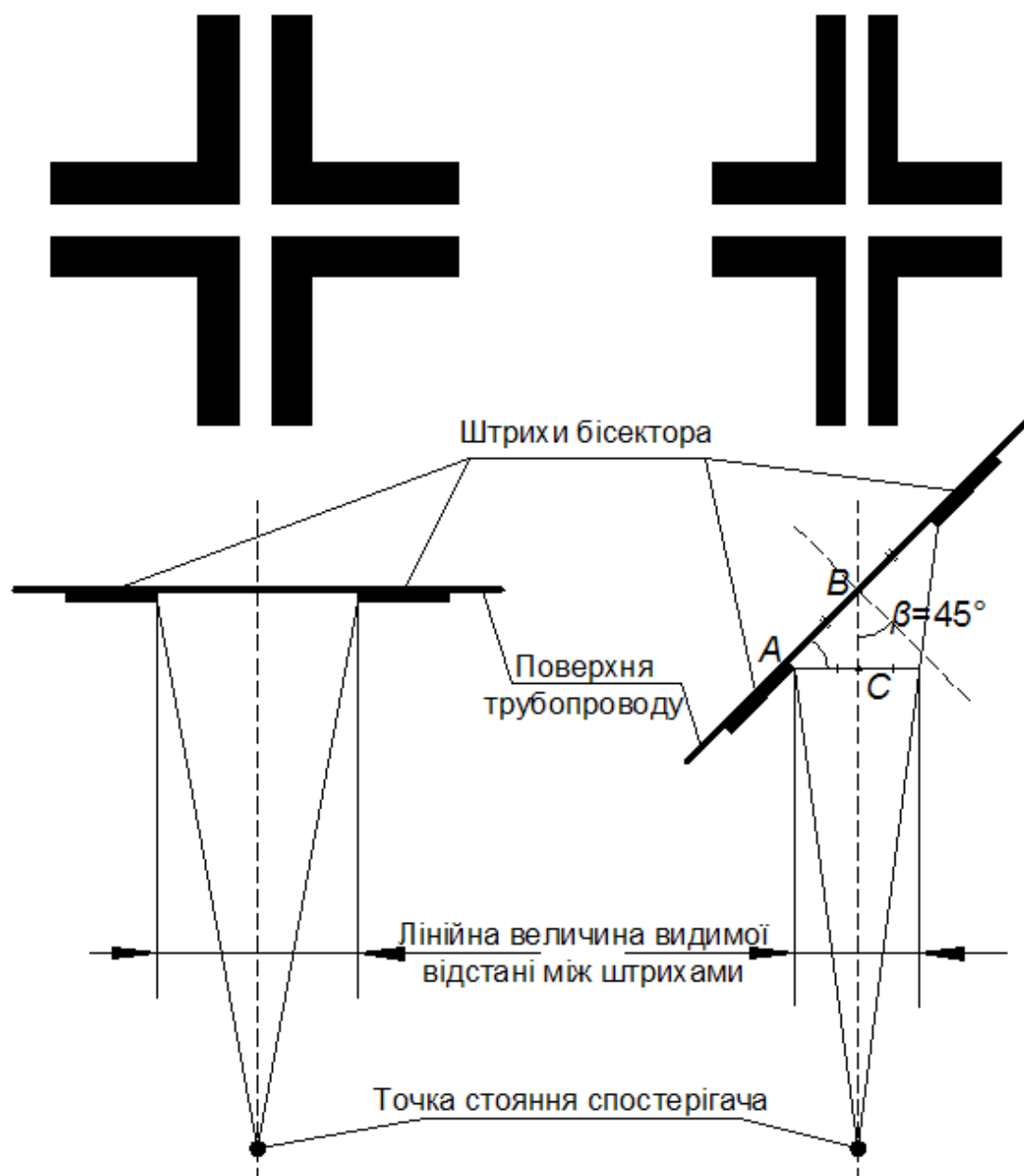


Рис. 3.8 Вигляд деформаційних марок для різних кутів візування

У табл. 3.3 наведено результати розрахунку розмірів семи візирних марок для спостереження за зміщеннями надземного переходу магістрального газопроводу (схема рис. 3.7).

Таблиця 3.3

Розміри візирної марки для наведення на різних відстанях та для різних кутів візування

Показники	Номер марки						
	1	2	3	4	5	6	7
Довжина візирного променя S , м	45	46	48	52	59	70	75
Віддаль між штрихами бісектора $a+a+x$, мм	2,8	2,9	3,0	3,3	3,7	4,4	4,7
Кут візування β , град.	0	10	20	30	40	50	53
Поправка в ширину бісектора δ	1,0	1,02	1,06	1,15	1,30	1,55	1,66
Віддаль між штрихами бісектора $A(\beta)$, мм	2,8	3,0	3,2	3,8	4,8	6,8	7,8

Для підтвердження теоретичних розрахунків було проведено експериментальне дослідження точності візування на марки різних розмірів [68]. Суть експерименту полягала в тому, що за допомогою електронного тахеометра бралися відліки по горизонтальному крузі на сім марок, параметри яких вказано в табл. 3.3. Довжину візирного променя і кут візування для кожної наступної марки збільшували. Для порівняння, в кожному варіанті візування визначалася точність наведення на марку, що розрахована для візирної віддалі 50 м і кута візування 0° (марка 0). Середня квадратична похибка візування для кожної марки визначалася з 25-ти вимірів. Результати досліджень зведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Середня квадратична похибка візування на деформаційну марку

Параметри наведення	Номер марки	Віддаль між штрихами бісектора $A(\beta)$, мм	СКП візування, секунди
$S=45$ м/ $\beta=0^\circ$	1	2,8	1,0
	0	3,3	1,2
$S=46$ м/ $\beta=10^\circ$	2	3	1,1
	0	3,3	1,2
$S=48$ м/ $\beta=20^\circ$	3	3,2	1,0
	0	3,3	1,3
$S=52$ м/ $\beta=30^\circ$	4	3,8	1,1
	0	3,3	1,9
$S=59$ м/ $\beta=40^\circ$	5	4,8	0,9
	0	3,3	1,3
$S=70$ м/ $\beta=50^\circ$	6	6,8	1,1
	0	3,3	1,9
$S=75$ м/ $\beta=53^\circ$	7	7,8	0,9
	0	3,3	1,5

Виконаємо перевірку гіпотези про покращення точності наведення на модифіковану марку в порівнянні із стандартною. Очевидно, що краще застосовувати ті марки, які забезпечують найменше розсіювання результатів.

Розглянемо гіпотезу про рівність дисперсій двох нормально розподілених сукупностей. Для перевірки такої гіпотези знаходимо функцію статистичних оцінок F вибраних сукупностей [53]:

$$F = \frac{\tilde{S}_X^2}{\tilde{S}_Y^2}, \quad (3.7)$$

де $\tilde{S}_X^2, \tilde{S}_Y^2$ - виправлені вибіркові дисперсії. З таблиці розподілу Фішера-Снедекора, за рівнем значущості та кількістю ступенів довільності $k_1 = n_1 - 1$, $k_2 = n_2 - 1$ (n_1, n_2 - обсяги вибірок), знаходимо значення критичної точки $F_{кр}$. Порівняння величин F та $F_{кр}$ дасть змогу прийняти або відкинути гіпотезу про рівність дисперсій.

Для кожної пари незалежних вибірок, обсягами $n_1 = n_2 = 25$, нормальних генеральних сукупностей X (модифікована марка) та Y (стандартна марка), знаходимо виправлені вибіркові дисперсії (табл.3.5).

Таблиця 3.5

Статистична перевірка гіпотез про рівність дисперсій

Параметри наведення	Номер марки	Виправлена дисперсія, \tilde{S}_i^2	F	$F_{кр} = (0,05;24;24)$
$S=45$ м/ $\beta=0^\circ$	1	1,0	1,4	1,98
	0	1,5		
$S=46$ м/ $\beta=10^\circ$	2	1,3	1,2	1,98
	0	1,5		
$S=48$ м/ $\beta=20^\circ$	3	1,0	1,7	1,98
	0	1,8		
$S=52$ м/ $\beta=30^\circ$	4	1,3	3,0	1,98
	0	3,8		
$S=59$ м/ $\beta=40^\circ$	5	0,8	2,1	1,98
	0	1,8		
$S=70$ м/ $\beta=50^\circ$	6	1,3	3,0	1,98
	0	3,8		
$S=75$ м/ $\beta=53^\circ$	7	0,8	2,8	1,98
	0	2,3		

З таблиці бачимо, що для кутів візування менших ніж 30° $F < F_{кр}$. Отже вибіркові дисперсії відрізняються не значимо. Тоді як для кутів візування більших 30° $F > F_{кр}$ – гіпотезу про рівність дисперсій відкидаємо. Проведена статистична оцінка підтверджує ефективність застосування модифікованої марки з бісектором для наведення під кутами більшими ніж 30° .

3.1.3. Дослідження точності вимірювання віддалей до плівкових відбивачів

На сьогодні в інженерній геодезії все частіше використовуються електронні тахеометри. У сфері точних і довгобазисних вимірювань беззмінним лідером залишаються призмові відбивачі (англ. prism reflector). Їх розмір і кількість підбираються у відповідності до поставленої задачі. Можуть бути використані як міні-призми 24 мм, так і блоки стандартних призм з трьох і більше відбивачів. Перевагами цього виду є висока відбивна здатність і можливість візування на великих віддальях. При цьому недоліками залишається громіздкість, крихкість, вузький діапазон відбивного кута і вартість.

Світловідбивні матеріали (англ. retroreflective, грец. катафот) можна охарактеризувати як матеріали або речовини, що дозволяють відбивати світло назад у напрямку джерела, незалежно від кута падіння світла [72]. Плівкові відбивачі виготовлені з використанням саме таких матеріалів. Їх класифікують за технологією виготовлення та типорозмірами. Часто використовують два основні принципи побудови альтернативних відбивних систем: стеклярус і мікропризмовий відбивач.

Можливість вимірювання віддалей до плівкових відбивачів значно розширює горизонти застосування електронних тахеометрів [140]. Самоклеючі плівкові відбивачі (ПВ) широко використовуються для монтажу обладнання, проведення виконавчих знімачів та спостережень за деформаціями інженерних об'єктів [24, 128]. Неможливо також обійтися без ПВ для створення просторової знімальної мережі в умовах щільної забудови

або промислового майданчику (у цехах, ангарах, депо і т.п.). Використання ПВ у важкодоступних місцях вимагає наведення під гострими кутами до їх площини. При цьому виникає запитання щодо достовірності та точності визначення віддалі.

У сучасній нормативній документації немає жодних згадок про плівкові відбивачі. Навчальна геодезична література обмежується лише даними про точність визначення віддалей до ПВ, на основі технічних характеристик відповідних приладів. Проаналізовано наукові праці [58, 72], в яких наведені дані експериментів з визначення залежності систематичної похибки визначення віддалі від кута повороту ПВ. Зацікавленість авторів [58] в даній проблемі виникла у зв'язку з виробничою задачею – закріплення опорних пунктів деформаційної мережі плівковими відбивачами. У працях [69, 83, 104] наведені методики досліджень безрефлекторного режиму електронного тахеометра для наведення на марки під різними кутами.

На думку автора, описана проблема потребує подальшого дослідження зі зміною умов проведення експерименту. Річ у тім, що у вищезазначених публікаціях дослідження виконувались для розвороту відбивача лише у горизонтальній площині. Необхідність наведення на ПВ під різними зенітними кутами потребує досліджень для розвороту відбивача і в горизонтальній і у вертикальній площинах.

Для вирішення поставленої задачі був проведений експеримент у лабораторних умовах. Дослідження проводились за допомогою плівкового відбивача розміром 40×40 мм фірми Sokkia, який закріплений на спеціально виготовленій пластині, що кріпиться до зорової труби теодоліта 2Т30 замість коліматорного візиру (рис. 3.9). Для виконання вимірювань віддалі використовувався електронний тахеометр Sokkia SET 530RK. Положення відбивача відносно падаючого променя тахеометра встановлювали зміною відліку на горизонтальному і вертикальному кругах теодоліта.



Рис. 3.9 Зовнішній вигляд теодоліта із закріпленим плівковим відбивачем

Згідно з паспортними даними приладу, номінальна похибка вимірювання віддалі електронним тахеометром Sokkia 530RK під час наведення на ПВ становить $\pm(3\text{мм}+2\cdot 10^{-6}D)$. Ця величина слугуватиме критерієм оцінки адекватності визначення віддалі до ПВ під гострим кутом до його площини.

Експериментальне дослідження виконувалося за такою методикою. Було проведено чотири серії досліджень: на віддалі 25 м, 50 м, 75 м, 100 м. Перед початком кожної серії площина плівкового відбивача встановлювалась перпендикулярно лінії візування (кут повороту відбивача в горизонтальній і вертикальній площинах дорівнює 0°). Поворот плівкового відбивача виконували в горизонтальній площині за ходом годинникової стрілки з кроком 15° . Поворот в заданому напрямку закінчувався у випадку неспроможності приладу виконати чергове вимірювання. На кожній установці виконувалось 15 прийомів вимірювання віддалі. Зазначений порядок установок повторювали для нахилу площини відбивача у вертикальній площині на 0° , 10° , 25° , 45° .

Оцінку точності визначення віддалі виконано за формулою Бесселя [115]:

$$m_s = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}, \quad (3.8)$$

де v – різниця між вимірним значенням віддалі і його середнім значенням з прийому; $n=15$ – кількість вимірів.

Результати обчислень середніх квадратичних похибок вимірювання віддалі до плівкового відбивача при його повороті до лінії візування наведені в табл. 3.6. З таблиці бачимо, що в більшості випадків середня квадратична похибка вимірювання віддалі не перевищує 1 мм. Лише в окремих випадках вона досягає 1,5 мм. Табличне представлення результатів досліджень дозволяє легко простежити рамки граничних кутів повороту плівкового відбивача на різних віддальях.

Таблиця 3.6

Середні квадратичні похибки вимірювання віддалі при наведенні на плівковий відбивач (мм)

Віддалі, м	Поворот відбивача у вертикальній площині	Поворот відбивача в горизонтальній площині					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
25		0°	15°	30°	45°	60°	75°
	0°	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
	10°	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	-
	25°	0,6	0,6	0,4	0,6	0,5	-
	45°	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	-
50		0°	15°	30°	45°	60°	75°
	0°	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7
	10°	0,6	0,7	0,5	0,5	1,1	-
	25°	0,5	0,5	0,5	0,7	1,1	-
	45°	0,4	0,7	0,6	0,8	-	-
75		0°	15°	30°	45°	60°	75°
	0°	0,5	0,4	0,6	0,6	0,9	-
	10°	0,3	0,5	0,6	0,7	1,1	-
	25°	0,3	1,0	0,6	0,5	1,1	-
	45°	1,3	0,5	0,7	1,1	-	-
100		0°	15°	30°	45°	60°	75°
	0°	0,9	0,8	0,6	0,7	-	-
	10°	0,5	0,5	0,7	0,6	-	-
	25°	0,4	0,6	0,6	1,3	-	-
	45°	0,7	0,5	1,5	-	-	-

Бачимо, що в межах робочих кутів повороту плівкового відбивача у вертикальній і горизонтальній площинах, похибка вимірювання віддалі до 100м не перевищує апріорного значення (3,2 мм), заявленого виробником.

Можливість вимірювання віддалей з високою точністю при великих кутах падіння променя, досягається завдяки мікроструктурі плівкових відбивачів, яка імітує систему призових відбивачів. Завдяки цьому вони знаходять широке застосування в інженерно-геодезичних роботах і можуть успішно використовуватись для спостереження за зміщеннями і деформаціями надземних газопроводів.

3.2. Визначення просторового положення надземних газопроводів з використанням безрефлекторного режиму електронного тахеометра

3.2.1. Визначення граничного кута падіння лазерного променя у безрефлекторному режимі

Відомо, що окрім обмеженої дальності дії безрефлекторного режиму електронного тахеометра (в залежності від марки приладу вона коливається від 100м до 2000м [55, 108]), існує граничний кут, для якого відбита електромагнітна хвиля не реєструється приймачем віддалемірною пристрою. Значення граничного кута залежить від матеріалу поверхні, на яку ведеться спостереження, її кольору і текстури. Закономірним є те, що найвища точність вимірювання віддалі (відповідно і точність визначення координат) досягається у випадку падіння променя під прямим кутом до поверхні і знижується при зменшенні цього кута [104].

Визначення граничного кута падіння лазерного променя до поверхні трубопроводу виконувалось для електронного тахеометра Sokkia SET 530RK. Спостереження виконувались на діючому газопроводі (надземний балковий перехід магістрального газопроводу «Союз» $D=1420\text{мм}$ через річку Бистриця Солотвинська, рис. 3.10).



Рис. 3.10 Спостереження на надземному переході газопроводу «Союз»
Дослідження виконувались на дамбі берегоукріплення, яка проходить нижче надземного газопроводу під прямим кутом до його осі. Після встановлення приладу на дамбі вісь газопроводу знаходилась на рівні горизонту приладу.

Перед початком спостережень на дамбі закріпили лінію довжиною 50м перпендикулярно до осі трубопроводу. Побудову лінії виконували тахеометром Sokkia SET 530RK за схемою, приведеною на рис. 3.11. Прилад встановили в т. А на віддалі близько 70 см від бокової твірної трубопроводу. За допомогою рулетки визначено віддаль b від осі обертання тахеометра до поверхні труби. Для побудови створної лінії, яка паралельна осі трубопроводу, на віддалі $l=15$ м в опорному перерізі встановлено горизонтально рейку. Зорову трубу наводять на відлік b на рейці, що дорівнює віддалі від тахеометра до трубопроводу. Повертаючи алідаду на 90° , в напрямку візирної осі на віддалі 50 м фіксують положення точки B_1 , закріплюючи її дерев'яним кілком. Для контролю і виключення похибок побудову повторюють при другому положенні вертикального круга. Відкладений проектний кут фіксують точкою B_2 . За остаточний напрямок приймають точку В – середню між точками B_1 і B_2 .

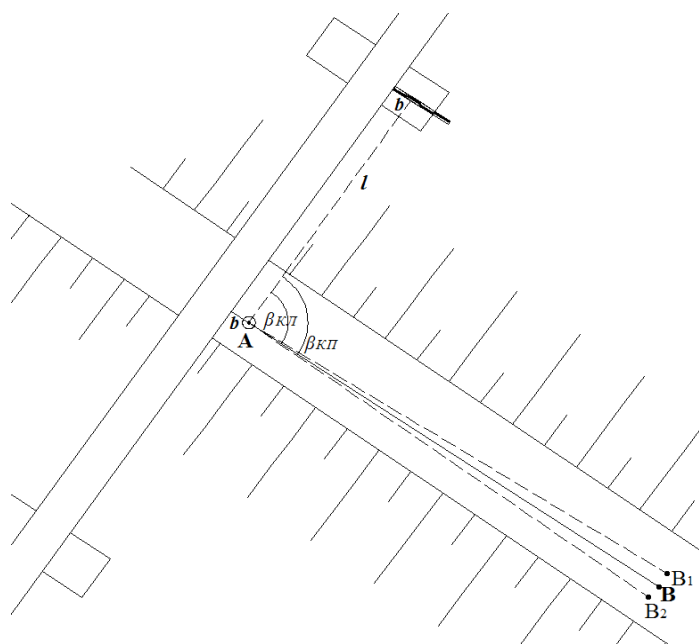


Рис. 3.11 Схема побудови перпендикуляра до осі трубопроводу

Середня квадратична похибка побудови кута за вказаною методикою може бути обчислена за формулою [56]

$$m_{\beta}^{90^{\circ}} = \sqrt{m_{np}^2 + m_{cme}^2 + m_n^2 + m_{\phi}^2}, \quad (3.9)$$

де m_{np} – середня квадратична похибка вимірювання кута електронним тахеометром ($m_{np}=5''$);

m_{cme} – похибка побудови створної лінії, паралельної осі трубопроводу:

$$m_{cme} = \frac{m_S}{l} \cdot \rho'', \quad (3.10)$$

де m_S – похибка визначення віддалі від вертикальної осі обертання приладу до поверхні трубопроводу ($m_S = 2$ мм), $l=15$ м – віддаль від тахеометра до місця встановлення рейки, тоді:

$$m_{cme} = 2 \cdot 206265''/15000 = 28'';$$

m_n – похибка взяття відліку на рейці внаслідок її повороту в горизонтальній площині:

$$m_n = \frac{b \cdot \nu^2}{2\rho^2}, \quad (3.11)$$

де $b=700$ мм – відлік на рейці, $\nu=4^{\circ}$ - величина нахилу рейки (приймається для розрахунків), $\rho=57,29^{\circ}$,

$$m_n = 700 \cdot 4^2 / (2 \cdot 57,29^2) = 1,7 \text{ мм},$$

кутова величина цієї похибки становить $23''$;

m_ϕ – похибка фіксування кута. Для фіксування на місцевості положення напрямку з допомогою дерев'яного кілка $m_\phi=2$ мм. Кутова величина цієї похибки для віддалі 50 м становить $m_\phi=8''$.

Підставляючи в формулу (3.9) значення відповідних похибок, отримаємо точність побудови перпендикуляру відносно осі трубопроводу:

$$m_\beta^{90^\circ} = \sqrt{5^2 + 28^2 + 23^2 + 8^2} = 37'' . \quad (3.12)$$

Вздовж побудованої лінії встановлювали тахеометр через кожні 5 м (рис. 3.12). На кожній точці стояння нуль лімба горизонтального круга тахеометра орієнтувався на точку перетину заданої лінії з віссю трубопроводу, що відповідає куту падіння променя 0° .

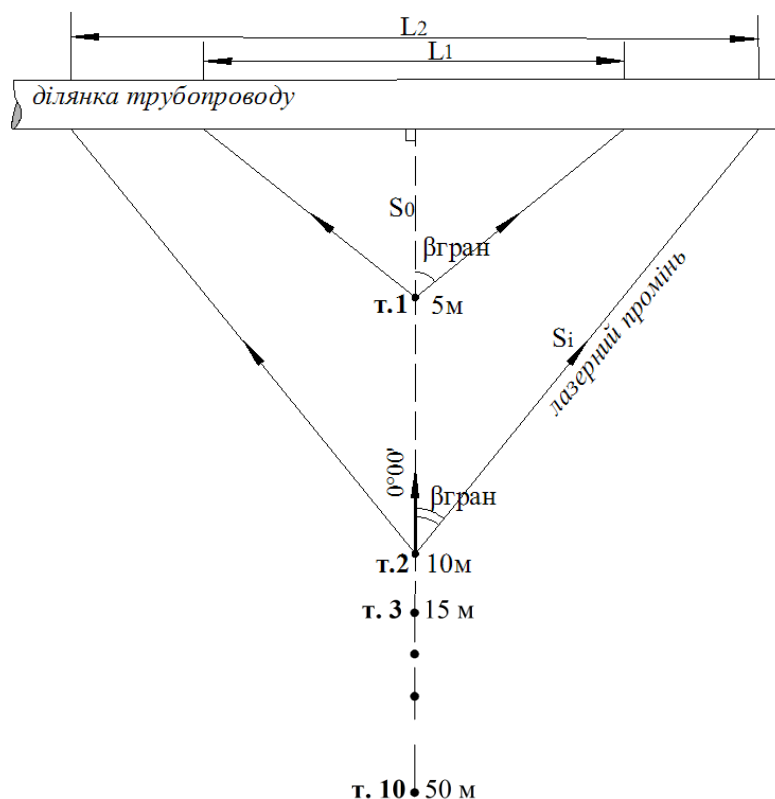


Рис. 3.12 Схема дослідження граничного кута роботи тахеометра в безрефлекторному режимі

Після цього, поступово повертаючи тахеометр на кут β , визначали координати трубопроводу до тих пір, доки для певного значення кута $\beta_{гран}$ прилад видає повідомлення: *<нет сигнала>* . Результати цих вимірів наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

**Визначення граничного кута для роботи тахеометра в
безрефлекторному режимі**

№ станції	Віддаль до газопроводу S_0 , м	Граничний кут $\beta_{\text{гран}}$	Довжина променя S_i , м	Довжина труби L , м
1	5	81°30'	33,733	33,362
2	10	74°11'	36,641	35,254
3	15	70°30'	44,900	42,325
4	20	68°13'	53,900	50,051
5	25	64°49'	58,736	53,153
6	30	62°12'	64,286	56,866
7	35	59°16'	68,419	58,810
8	40	55°43'	70,971	58,641
9	45	54°19'	77,093	62,619
10	50	49°43'	79,958	60,996

За значеннями віддалі тахеометра від осі трубопроводу S_0 і граничним кутом $\beta_{\text{гран}}$ з прямокутного трикутника обчислюємо довжину ділянки трубопроводу L , координати якої можна визначити з даної станції (табл. 3.7).

З табл. 3.7 бачимо, що оптимальним розташуванням приладу від осі трубопроводу для нашого випадку є віддаль 45 м. На віддалі 45 м граничний кут роботи безрефлекторного режиму складає 54°19', що відповідає максимальній довжині досліджуваної ділянки труби і становить 62,619 м. Таким чином, робота приладу в межах 54°19' в один і інший бік від нормалі до трубопроводу дозволить визначити координати точок трубопроводу довжиною близько 125 м.

Для оцінки точності отримання координат трубопроводу в безрефлекторному режимі електронного тахеометра на віддалі 45 м проведено дослід за такою схемою. Електронний тахеометр встановлено на віддалі 45 м від трубопроводу в створі лінії, яка перпендикулярна до осі трубопроводу. Нуль лімба горизонтального круга тахеометра зорієнтовано в напрямку створу (відлік на ГК на точку перетину створу з віссю трубопроводу 0°00'). На трубопроводі відмічено точки, що відповідають відліку на горизонтальному крузі 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 53° (рис. 3.13).

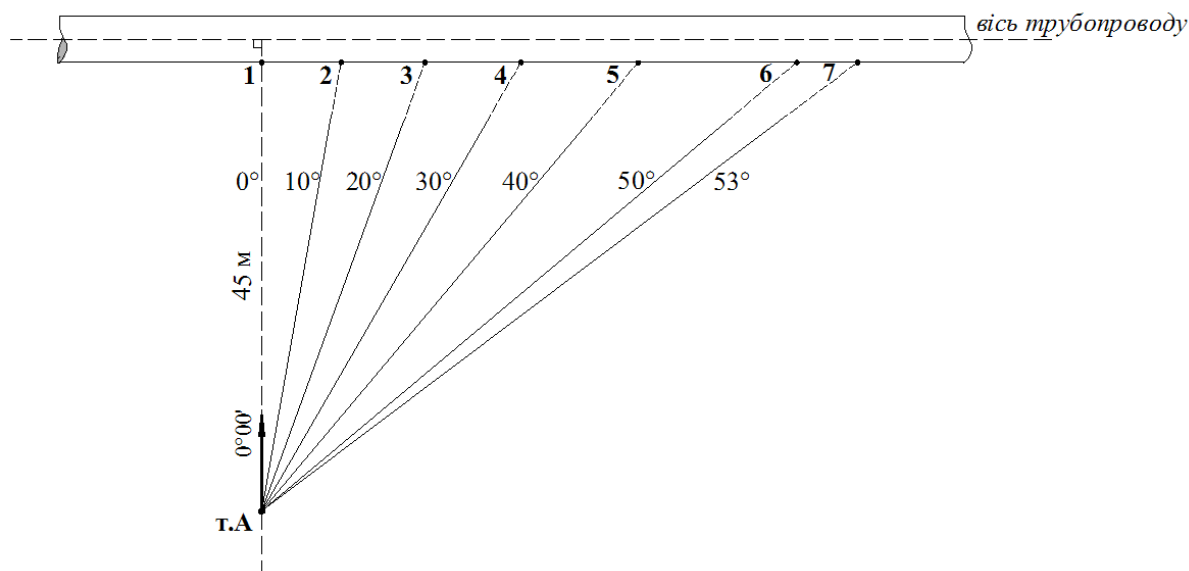


Рис. 3.13 Схема дослідження точності визначення координат точок трубопроводу

3.2.2. Оцінка точності результатів вимірів в безрефлекторному режимі

Апріорна оцінка точності. Точність визначення координат точок змінюватиметься залежно від вимірної віддалі і кута. Тому коефіцієнти вагової матриці для різних точок будуть різними. Координати точок на поверхні трубопроводу одержано опосередковано за кутовими та лінійними вимірюваннями. Вони обчислюються за відомими формулами просторової полярної засічки:

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + \Delta x = X_0 + S \cos \nu \cos \beta \\ Y_i &= Y_0 + \Delta y = Y_0 + S \cos \nu \sin \beta \\ H_i &= H_0 + \Delta h = H_0 + S \sin \nu \end{aligned} \quad (3.13)$$

де X_0 , Y_0 , H_0 – координати вихідної точки, над якою центрований тахеометр; Δx , Δy , Δh – прирости координат; S – виміряна нахилена віддаль; β – вимірний горизонтальний кут; ν – вимірний вертикальний кут.

Оскільки безпосередньо спостережуваними величинами є горизонтальні та вертикальні кути і віддалі, для отримання середніх квадратичних похибок координат точок використовують правило перетворення коваріацій. У відповідності з цим правилом, матрицю C_P середніх квадратичних похибок координат точки визначають з виразу [23]:

$$\mathbf{C}_P = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}_L \cdot \mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} m_X^2 & c_{XY} & c_{XH} \\ c_{XY} & m_Y^2 & c_{YH} \\ c_{XH} & c_{YH} & m_H^2 \end{pmatrix}, \quad (3.14)$$

де \mathbf{C}_L – коваріаційна матриця; \mathbf{A} – матриця частинних похідних; m_X, m_Y, m_H – середні квадратичні похибки відповідних координат; c_{ij} – кореляційні моменти. Матриця \mathbf{C}_L без врахування кореляційних зв'язків має вигляд:

$$\mathbf{C}_L = \begin{pmatrix} m_S^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_\beta^2 \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

де m_S, m_v, m_β – середні квадратичні похибки визначення віддалі, вертикального та горизонтального кутів.

Шляхом диференціювання формул (3.13) для визначення приростів координат, знаходимо коефіцієнти матриці \mathbf{A} частинних похідних:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta x}{\partial S} & \frac{\partial \Delta x}{\partial v} & \frac{\partial \Delta x}{\partial \beta} \\ \frac{\partial \Delta y}{\partial S} & \frac{\partial \Delta y}{\partial v} & \frac{\partial \Delta y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial \Delta h}{\partial S} & \frac{\partial \Delta h}{\partial v} & \frac{\partial \Delta h}{\partial \beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos v & -S \cos \beta \sin v & -S \sin \beta \cos v \\ \sin \beta \cos v & -S \sin \beta \sin v & S \cos \beta \cos v \\ \sin v & S \cos v & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Використовуючи формули (3.13)-(3.16), та приймаючи, що для вимірів буде використано електронний тахеометр Sokkia 530 RK ($m_S = 3$ мм, $m_{v, \beta} = 5''$), виконаємо апіорну оцінку точності координат точок 1-7 на трубопроводі (рис. 3.13). Результати розрахунків представлені в табл. 3.8.

Оцінка точності за емпіричними даними. Для оцінки точності визначення координат кожної з семи точок, відмічених на трубопроводі, виконано 30 вимірів. В результаті отримано 30 значень віддалі, 30 значень вертикальних і горизонтальних кутів. Тому маємо загальне число невідомих $t=3$ і число вимірів $n=90$. Ці умови свідчать про те, що система рівнянь, яка відображає процес вимірів є перевизначеною. Це дає змогу знайти зрівняне значення координат, а також виконати оцінку точності отриманих результатів. Для цього застосуємо параметричний метод урівнювання [46].

Зв'язок між вимірними величинами та невідомими (координатами) представлений наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + h_i^2} = S_i + v_i \\ f_2 &= \arctg \frac{h_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} = v_i + v_i, \\ f_3 &= \arctg \frac{y_i}{x_i} = \beta_i + v_i \end{aligned} \quad (3.17)$$

де v_i – поправки для вимірних величин.

Запишемо систему рівнянь поправок в загальному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_1}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_1}{\partial h} \delta h + (S_0 - S_i) &= v_{S_i} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_2}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_2}{\partial h} \delta h + (v_0 - v_i) &= v_{v_i} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_3}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_3}{\partial h} \delta h + (\beta_0 - \beta_i) &= v_{\beta_i} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Введемо позначення:

$$\left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right) = a_i ; \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \right) = b_i ; \left(\frac{\partial f_i}{\partial h} \right) = c_i ; S_0 - S_i = l_{S_i} ; v_0 - v_i = l_{v_i} ; \beta_0 - \beta_i = l_{\beta_i} . \quad (3.19)$$

Запроваджені позначення системи лінійних рівнянь (3.18) можна записати в матричній формі:

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & c_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix}, \quad (3.20)$$

або в скороченому вигляді:

$$\mathbf{a} \cdot \delta + \mathbf{l} = \mathbf{v} . \quad (3.21)$$

Коефіцієнти рівнянь поправок матриці \mathbf{a} , розміром (90×3) , отримуємо шляхом диференціювання функцій (3.17). Тоді (3.20) матиме вигляд:

$$\begin{pmatrix} \cos v_i \cos \beta_i & \cos v_i \sin \beta_i & \sin v_i \\ -\frac{\cos \beta_i \sin v_i}{S_i} & -\frac{\sin \beta_i \sin v_i}{S_i} & -\frac{\cos v_i}{S_i} \\ -\frac{\sin \beta_{90}}{S_{90} \cos v_{90}} & -\frac{\cos \beta_{90}}{S_{90} \cos v_{90}} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \dots \\ l_{90} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_{90} \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

Так як координати, а також їх прирости (вектор δ), не є прямо вимірними величинами, вводимо вагову матрицю вимірів для коректного розрахунку величин поправок v_i . Вагова матриця P_i розміром (90×90) має діагональний вигляд:

$$P_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{S_i}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{S_{30}}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{v_i}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{v_{30}}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{\beta_i}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{\beta_{30}}^2} \end{pmatrix}. \quad (3.23)$$

Система нормальних рівнянь матиме відомий вигляд [120]:

$$N \delta + L = 0, \quad (3.24)$$

де $N = A^T P A$ – квадратна матриця коефіцієнтів нормальних рівнянь; $L = A^T P l$ – вектор вільних членів нормальних рівнянь. Вектор δ знаходимо за наступною схемою:

$$\delta = -N^{-1} \cdot L. \quad (3.25)$$

Розв'язком системи нормальних рівнянь будуть прирости координат. Після знаходження зрівняних координат визначаємо поправки v_i . Середню квадратичну похибку одиниці ваги μ знаходять за формулою [46]

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{n - k}}, \quad (3.26)$$

де $n=90$ кількість вимірів, $k=3$ кількість необхідних вимірів.

Квадрат середньої квадратичної похибки сукупності невідомих x, y, h є матрицею, яка отримана множенням квадрата похибки одиниці ваги μ на матрицю C_P (3.14):

$$\mathbf{M}^2 = \mu^2 \mathbf{C}_P = \mu^2 \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xh} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yh} \\ C_{hx} & C_{hy} & C_{hh} \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

тоді
$$m_x = \mu\sqrt{C_{xx}}, \quad m_y = \mu\sqrt{C_{yy}}, \quad m_h = \mu\sqrt{C_{hh}}. \quad (3.28)$$

Середню квадратичну похибку визначення планового положення точки на трубопроводі визначаємо за формулою

$$m_{xy} = \sqrt{m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2}. \quad (3.29)$$

Результати обчислень середніх квадратичних похибок визначення координат точок електронним тахеометром в безрефлекторному режимі на віддалі 45 метрів від трубопроводу представлені в табл. 3.8. Для порівняння в табл. 3.8 також представлені середні квадратичні похибки визначення координат точок, отриманих в результаті апіорної оцінки точності для відповідних віддалей та кутів падіння променя. За отриманими даними побудовано графіки, зображені на рис. 3.14.

Таблиця 3.8

Середні квадратичні похибки визначення планових і висотних координат контрольних точок

№ точки	Кут падіння променя, β	m_{xy} , мм	$m_{xy}^{анп.}$, мм	m_h , мм	$m_h^{анп.}$, мм
1	0^0	2,0	3,2	0,7	1,1
2	10^0	2,0	3,2	0,7	1,1
3	20^0	2,3	3,2	0,8	1,2
4	30^0	2,8	3,3	1,1	1,3
5	40^0	3,6	3,3	1,8	1,4
6	50^0	4,8	3,4	2,5	1,7
7	53^0	5,8	3,5	2,5	1,8

З графіків бачимо, що у випадку падіння променя на поверхню трубопроводу під кутом до 37^0 , точність визначення планових координат не перевищує теоретично розраховану. У випадку збільшення кута падіння променя від 37^0 до граничного кута 53^0 точність визначення координат змінюється від 3,3 мм до 5,8 мм.

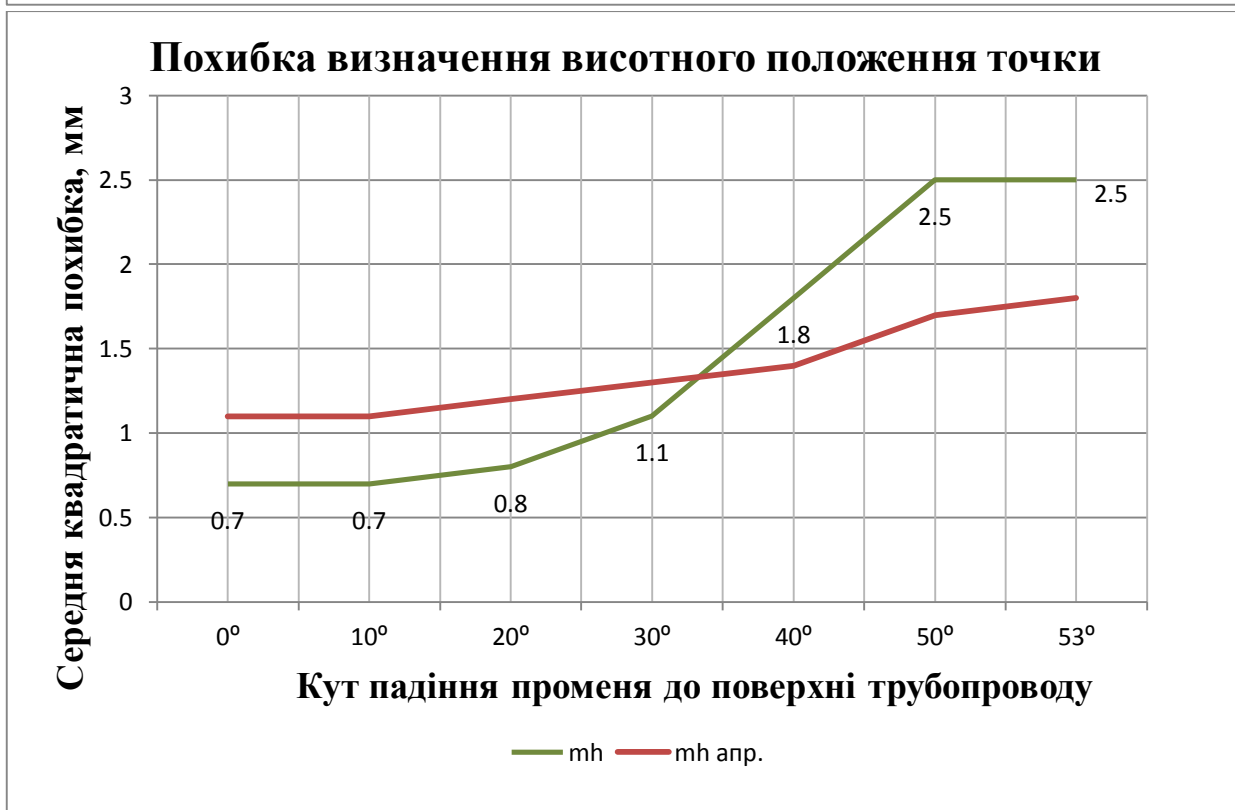
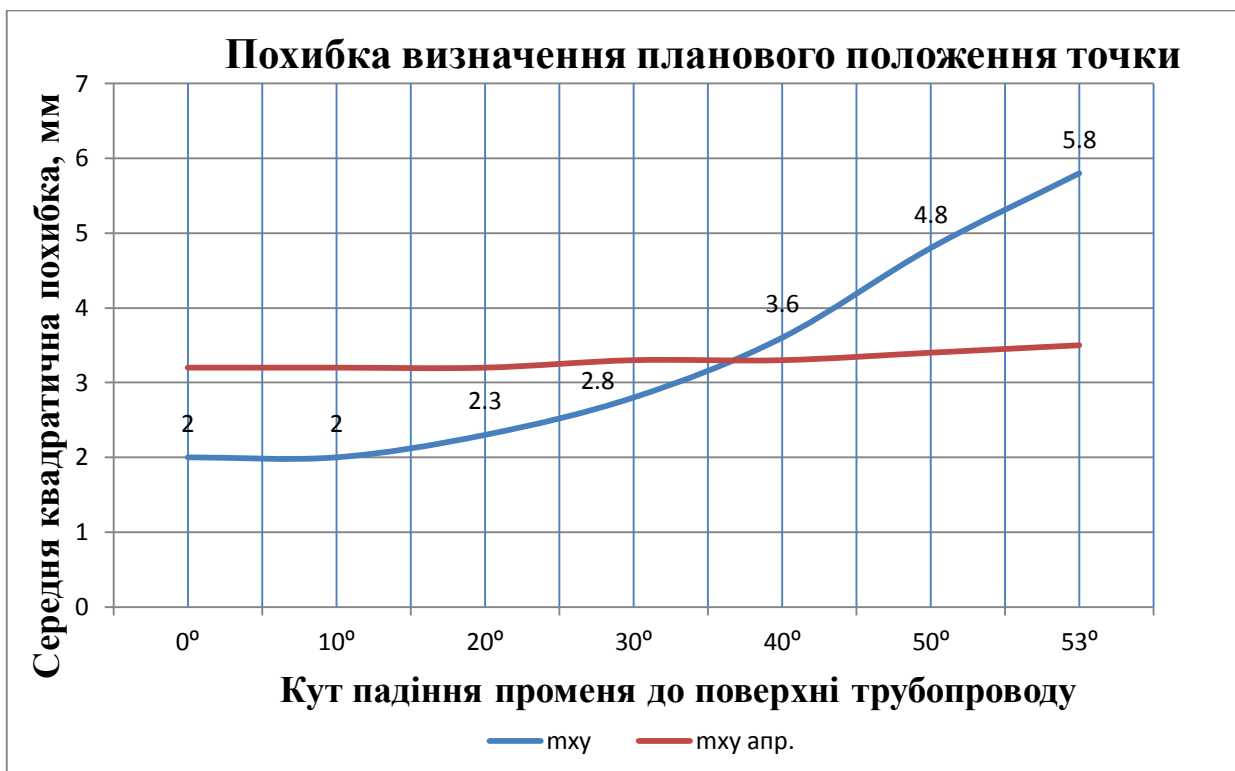


Рис.3.14 Графік залежності похибки визначення координат точок від кута падіння променя

Отримані значення похибок висотного положення точок, аналогічно плановим координатам, перевищують теоретично розраховані значення для кутів падіння променя більше 33°.

Побудова еліпсів похибок. Відомо, що середня квадратична похибка m_{xy} , обчислена за формулою (3.29), використовується виходячи з припущення, що розсіювання вимірів на осях X і Y має однакову ймовірність. Еліпс похибок, його орієнтація і розміри півосей визначають найбільш вірогідні напрямки і величину максимальної та мінімальної похибки визначення координат. Для знаходження елементів еліпса планових похибок скористаємось співвідношенням (3.27) [139]. Відомо, що поворотом координатних осей на певний кут φ можна підібрати таку систему координат UV , для якої недіагональні елементи матриці \mathbf{C} дорівнюватимуть нулю. Тоді (3.27) матиме вигляд:

$$\mathbf{M}^2 = \mu^2 \begin{pmatrix} C_{UU} & 0 \\ 0 & C_{VV} \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Необхідний для такого перетворення кут повороту осей φ обчислюється за формулою

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2C_{xy}}{C_{xx} - C_{yy}}, \quad (3.31)$$

а елементи C_{UU} , C_{VV} на основі рівнянь:

$$\begin{aligned} C_{UU} &= \frac{1}{2} \left\{ C_{xx} + C_{yy} + \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + 4C_{xy}^2} \right\} \\ C_{VV} &= \frac{1}{2} \left\{ C_{xx} + C_{yy} - \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + 4C_{xy}^2} \right\}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Значення великої і малої півосей еліпса похибок знаходимо за формулами

$$a = \mu\sqrt{C_{UU}}, \quad b = \mu\sqrt{C_{VV}} \quad (3.33)$$

Зображення еліпсів похибок, елементи яких розраховані за алгоритмом (3.31)-(3.33), для точок розташованих на трубопроводі, представлені на рис. 3.15.

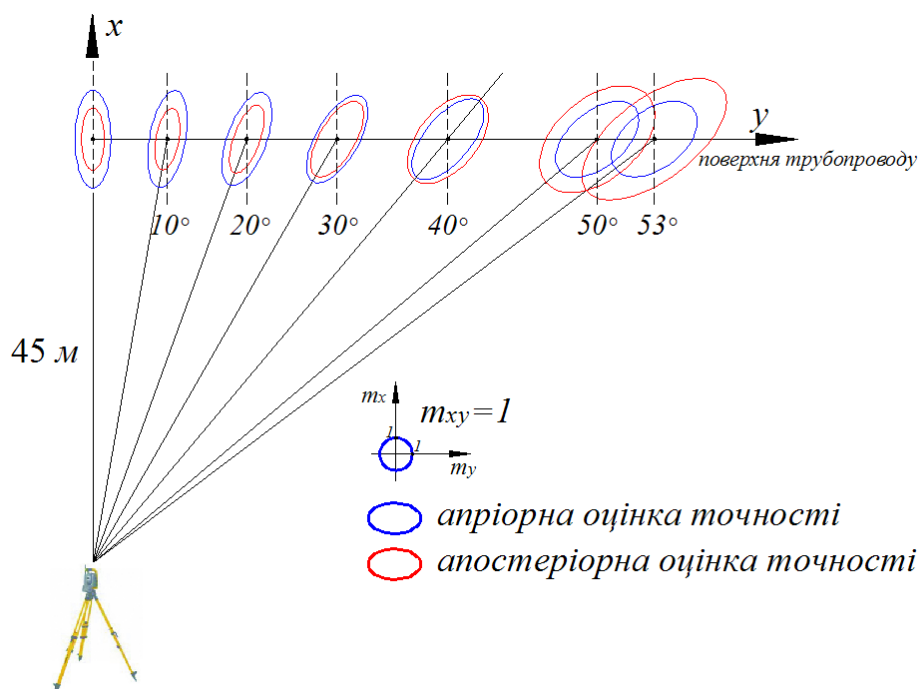


Рис.3.15 Еліпси похибок контрольних точок на поверхні трубопроводу

Аналізуючи рис. 3.15, бачимо, що для кутів падіння променя більше 30° емпірична середня квадратична похибка координат перевищує значення априорної оцінки точності. Ці дані співпадають з відповідними значеннями представленими на рис. 3.14.

3.2.3. Дослідження точності безрефлекторного режиму електронного тахеометра

З метою дослідження точності визначення координат у безрефлекторному режимі на різних відстанях і для різних кутів падіння променя був проведений такий дослід.

Для імітації поверхні трубопроводу була виготовлена плоска марка, розміром 200×200 мм, на поверхню якої нанесено лакофарбове покриття сріблястого кольору (імітація поверхні надземного трубопроводу). Марка прикріплювалась до спеціально виготовленої пластини, що встановлювалась на зорову трубу теодоліта 2Т30 таким чином, що вертикальна вісь обертання приладу збігалася з площиною марки, а візирна вісь була перпендикулярна площині марки. Завдяки такій конструкції марку можна повертати в

горизонтальні площині на визначений кут. Дослід проводився за схемою, представленою на рис.3.16.

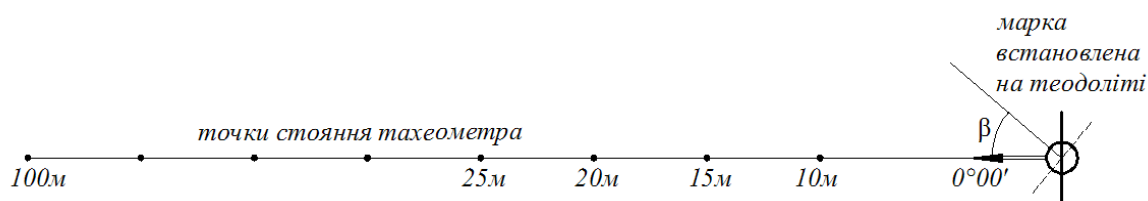


Рис. 3.16 Схема дослідження точності визначення координат марки

На одному з кінців лінії, довжиною 100 метрів, встановлено теодоліт з маркою. Марка встановлювалась перпендикулярно до лінії з допомогою зорової труби, а нуль лімба горизонтального круга теодоліта орієнтувався вздовж цієї лінії.

Вказана пряма лінія була розділена на п'ятиметрові відрізки, на кінцях яких встановлювали електронний тахеометр. Таким чином, віддаль від тахеометра до теодоліта з маркою змінювалась з кроком 5 метрів, починаючи з віддалі 10 метрів. На кожній станції тахеометром виконувалось 30 прийомів вимірювання віддалі до марки при одному положенні кута падіння променя. Змінюючи відлік на горизонтальному крузі теодоліта з кроком 10° , змінювали кут падіння променя до поверхні марки. Зі збільшенням віддалі граничний кут роботи безрефлекторного режиму тахеометра зменшувався від 80° до 30° .

За формулою Бесселя були визначені середні квадратичні похибки вимірювання віддалі до марки для різних кутів падіння променя. Результати дослідження представлені в табл. 3.9. Для порівняння в таблиці також представлені результати апріорної оцінки точності вимірювання віддалі.

Таблиця 3.9

Середні квадратичні похибки m_d (мм) визначення віддалі

Кут повороту марки β_i Віддаль до марки S_i , м	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
10 м	0,6 ^(3,0)	0,9 ^(3,0)	0,9 ^(3,0)	1,3 ^(3,0)	1,6 ^(3,0)	2,0 ^(3,0)	2,9 ^(3,0)	2,6 ^(3,0)	3,2 ^(3,0)
15 м	0,9 ^(3,0)	1,1 ^(3,0)	1,2 ^(3,0)	1,3 ^(3,0)	1,7 ^(3,0)	1,4 ^(3,0)	2,0 ^(3,0)	3,1 ^(3,0)	3,5 ^(3,0)
20 м	0,8 ^(3,0)	1,1 ^(3,0)	1,0 ^(3,0)	1,0 ^(3,0)	1,6 ^(3,0)	1,9 ^(3,0)	2,2 ^(3,0)	2,6 ^(3,0)	4,3 ^(3,0)
25 м	1,0 ^(3,1)	1,0 ^(3,1)	1,0 ^(3,1)	1,1 ^(3,1)	1,8 ^(3,1)	2,4 ^(3,1)	2,4 ^(3,1)	4,5 ^(3,1)	5,2 ^(3,1)
30 м	0,8 ^(3,1)	1,7 ^(3,1)	1,6 ^(3,1)	1,6 ^(3,1)	1,8 ^(3,1)	2,4 ^(3,1)	3,4 ^(3,1)	4,8 ^(3,1)	-
35 м	0,7 ^(3,1)	1,6 ^(3,1)	1,9 ^(3,1)	2,1 ^(3,1)	2,4 ^(3,1)	2,8 ^(3,1)	3,8 ^(3,1)	4,7 ^(3,1)	-
40 м	0,9 ^(3,1)	1,5 ^(3,1)	2,9 ^(3,1)	2,8 ^(3,1)	3,0 ^(3,1)	3,2 ^(3,1)	4,0 ^(3,1)	4,8 ^(3,1)	-
45 м	0,7 ^(3,1)	1,1 ^(3,1)	1,5 ^(3,1)	2,5 ^(3,1)	2,6 ^(3,1)	3,2 ^(3,1)	3,5 ^(3,1)	-	-
50 м	0,9 ^(3,1)	1,2 ^(3,1)	1,4 ^(3,1)	2,0 ^(3,1)	2,6 ^(3,1)	3,3 ^(3,1)	5,1 ^(3,1)	-	-
55 м	1,3 ^(3,1)	2,0 ^(3,1)	2,1 ^(3,1)	2,4 ^(3,1)	3,2 ^(3,1)	3,5 ^(3,1)	5,7 ^(3,1)	-	-
60 м	1,3 ^(3,1)	2,1 ^(3,1)	2,6 ^(3,1)	3,3 ^(3,1)	4,4 ^(3,1)	4,8 ^(3,1)	-	-	-
65 м	1,4 ^(3,1)	1,8 ^(3,1)	2,8 ^(3,1)	3,1 ^(3,1)	4,3 ^(3,1)	4,1 ^(3,1)	-	-	-
70 м	1,6 ^(3,1)	2,0 ^(3,1)	2,7 ^(3,1)	4,9 ^(3,1)	4,2 ^(3,1)	-	-	-	-
75 м	1,4 ^(3,2)	1,4 ^(3,2)	3,3 ^(3,2)	5,2 ^(3,2)	-	-	-	-	-
80 м	1,1 ^(3,2)	3,2 ^(3,2)	3,3 ^(3,2)	4,8 ^(3,2)	-	-	-	-	-
85 м	1,4 ^(3,2)	3,1 ^(3,2)	4,1 ^(3,2)	5,6 ^(3,2)	-	-	-	-	-
90 м	1,7 ^(3,2)	2,3 ^(3,2)	5,2 ^(3,2)	5,3 ^(3,2)	-	-	-	-	-
100 м	1,8 ^(3,2)	2,3 ^(3,2)	3,6 ^(3,2)	4,2 ^(3,2)	-	-	-	-	-

* ^(0,0) – значення апріорної оцінки точності

Табличне представлення результатів досліджень дозволяє легко проаналізувати отримані дані. В табл. 3.9 блакитним кольором виділені комірочки в яких значення точності вимірювання віддалі не перевищують теоретично розрахованих. Бачимо, що діапазон цих значень зужується при збільшенні віддалі до марки. Точність визначення віддалі до марки у безрефлекторному режимі тахеометра на віддалі до 100 метрів не перевищує 5,7 мм. Зауважимо, що вищеописані досліди проводились при температурі від +3°C до +14°C і хмарній погоді. Це дало змогу знизити вплив рефракції при візуванні на марку та високої освітленості, що понижує точність лазерних приладів.

3.2.4. Аналітичне представлення результатів похибки вимірювання віддалі в безрефлекторному режимі тахеометра

Для того, щоб описати аналітичну модель результатів вимірювання віддалі електронним тахеометром у безрефлекторному режимі, розглянемо вплив джерел похибок на величину вимірюваної віддалі. В розгорнутому вигляді формула для визначення точності вимірювання віддалі фазовим методом має вигляд [92]:

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{v}{pf}\right)^2 m_\phi^2 + m_d^2 + m_l^2 + D^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2 \right]}, \quad (3.34)$$

де m_ϕ – середня квадратична похибка реєстрації фази, m_d – середня квадратична похибка фази опорної напруги, m_l – середня квадратична похибка постійної поправки далекоміра, m_f – середня квадратична похибка масштабної частоти, m_v – середня квадратична похибка робочої швидкості поширення електромагнітних хвиль.

Позначивши суму квадратів похибок, які не залежать від довжини вимірюваної лінії через

$$P = \left(\frac{v}{pf}\right)^2 m_\phi^2 + m_d^2 + m_l^2, \quad (3.35)$$

а суму квадратів відносних похибок, величина яких пропорціональна довжині вимірюваної віддалі, через

$$Q = \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2, \quad (3.36)$$

можемо записати формулу (3.34) в такому виді:

$$m_D = \sqrt{P + Q \cdot D^2}. \quad (3.37)$$

Частіше застосовують широко розповсюджену формулу, яка є лінійною апроксимацією кривої, що відповідає рівнянню (3.37) [92]:

$$m_D = \pm(a + b \cdot D). \quad (3.38)$$

Для безрефлекторного режиму вимірювання віддалі тахеометром Sokkia SET 530RK, яким виконувався дослід, описаний в пункті 3.2.2, лінійне рівняння регресії має вигляд:

$$m_D = \pm(3 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}).$$

Аналізуючи результати дослід, які наведені в табл. 3.9, бачимо, що величина m_D перевищує апріорне значення у випадку вимірювання віддалі до поверхні розвернутої на кут β відносно падаючого променя. Для того, щоб представити отримані емпіричні дані в математичному виді, скористаємось алгоритмом, наведеним нижче.

На основі даних табл. 3.9 запишемо лінійне рівняння регресії виду (3.38). Таких рівнянь буде дев'ять, оскільки точність вимірювання віддалі визначалася на різних дистанціях для кутів падіння променя від 0° до 80° з кроком 10° .

Значення параметрів a і b (3.38) знаходять за методом найменших квадратів, використовуючи величини m_D , отримані за результатами вимірів. Для цього складають рівняння поправок виду [73]:

$$a + b \cdot D_i + l_i = v_i, \quad (3.39)$$

де $l_i = -|m_D|$. Перехід від рівнянь поправок (3.39) до нормальних рівнянь і їх розв'язок виконується методом найменших квадратів з врахуванням вагової діагональної матриці \mathbf{P} виду:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \frac{100}{D_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{100}{D_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{100}{D_n} \end{pmatrix}.$$

Результати розрахунків коефіцієнтів a і b наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Коефіцієнти лінійного рівняння регресії

Кут падіння променя, β	a , мм	$b \cdot D \cdot 10^{-5}$, мм
0°	0,6	1
10°	0,7	2
20°	0,5	4
30°	0,4	5
40°	0,9	4
50°	1,2	5
60°	1,6	6
70°	1,7	9
80°	1,8	13

Аналізуючи отримані дані бачимо, що коефіцієнт a (похибки, які не залежать від довжини вимірюваної віддалі) і коефіцієнт b (похибки, які пропорційні довжині вимірюваної віддалі) збільшуються зі зміною кута падіння променя віддалеміра. Проаналізуємо природу цих залежностей, спираючись на відомі нам дані [92]. Середня квадратична похибка фази опорної напруги m_d і похибка постійної поправки віддалеміра m_l є складовими коефіцієнта a . Вони не залежать від довжини вимірюваної віддалі і не будуть змінюватись при зміні кута падіння променя β на відбиваючу поверхню. Третя складова коефіцієнта a – похибка фіксації фази m_ϕ . Її величина залежить від рівня світлового потоку, який приймається віддалеміром з дистанції. Відомо, що для віддалей, які суттєво менші граничної дальності віддалеміра, похибка фіксації фази практично не залежить від віддалі. З наближенням до граничного значення віддалі інтенсивність світлового потоку знижується, одночасно збільшуються його відносні флуктуації. В нашому випадку інтенсивність світлового потоку

знижується зі збільшенням кута падіння променя на дифузну поверхню за законом Ламберта [37]. Тому похибка реєстрації фази, а з нею і коефіцієнт a , збільшується із наближенням кута до граничного значення. Аналогічно впливає зниження інтенсивності відбитого променя на відносну похибку масштабної частоти $\frac{m_f}{f}$, яка входить в значення коефіцієнта b .

Другим етапом створення аналітичної моделі є апроксимація параметрів a і b , які є функціями кута β . Для вибору виду функцій для апроксимації параметрів a і b скористаємось графіками, побудованими на основі даних табл. 3.10 (рис. 3.17).

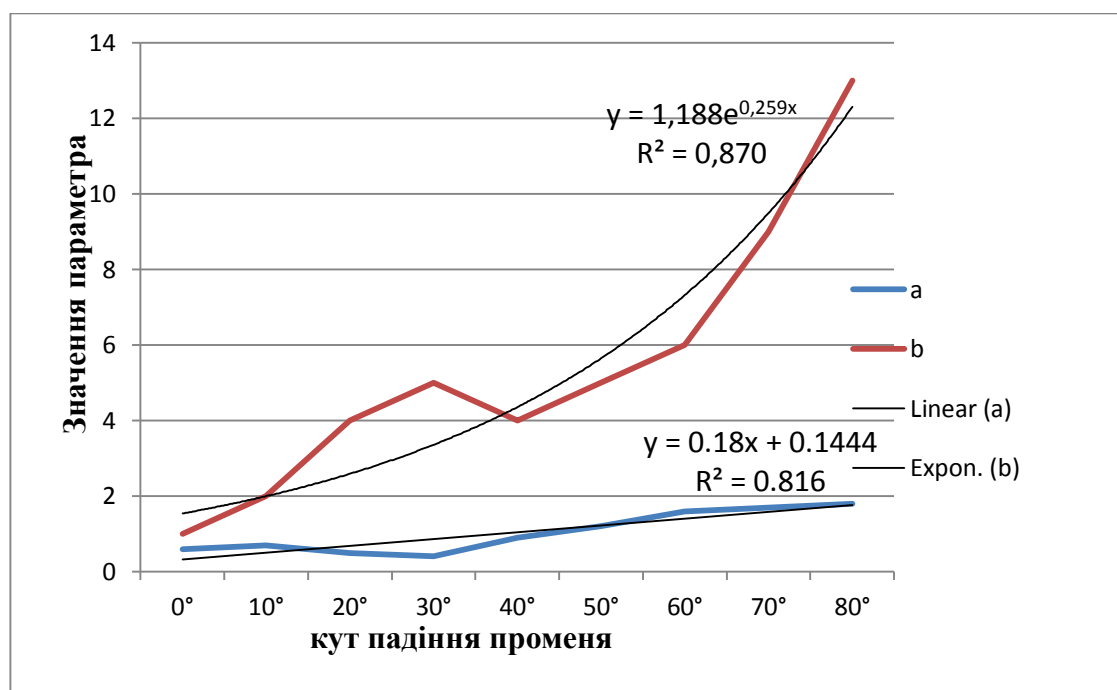


Рис. 3.17 Графік зміни параметрів a і b

Програма Microsoft Excel дає змогу побудувати лінії тренду для графіків на рис. 3.17 та оцінити рівень достовірності апроксимації (R^2). Встановлено, що зміну коефіцієнта a найкраще описує лінійна функція, коефіцієнта b – експоненціальна.

За даними табл. 3.10 знайдемо лінійне рівняння регресії параметра a виду:

$$a = c \cdot \beta + d \quad (3.40)$$

Коефіцієнти c і d визначаємо за методом найменших квадратів. Так як значення параметрів a одержані для різних кутів β , їх величини є нерівноточними і характеризуються вагами p_i . Рівняння поправок матимуть вигляд:

$$c \cdot \beta + d - a_i = v_i, \quad (3.41)$$

а вагова матриця \mathbf{P} , розміром 9×9 , матиме вигляд:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\beta_n} \end{pmatrix}. \quad (3.42)$$

В результаті проведених розрахунків отримаємо значення лінійної регресії параметра a :

$$a = 0,6\beta + 0,6, \quad (3.43)$$

де β в радіанах.

Коефіцієнти c і d експоненціального рівняння регресії, яким апроксимується параметр b , знаходимо за методом найменших квадратів з врахуванням вагової матриці (3.42). Для цього рівняння виду:

$$b = c \cdot e^{d \cdot \beta}, \quad (3.44)$$

приводимо до лінійного виду шляхом логарифмування:

$$\ln b = \ln c + d\beta \cdot \ln e.$$

Після заміни $b' = \ln b$, $c' = \ln c$ отримаємо лінійний вид функції:

$$b' = d \cdot \beta + c'. \quad (3.45)$$

Тоді рівняння поправок матиме вигляд:

$$d\beta + c' - \ln b_i = v_i. \quad (3.46)$$

Після проведених розрахунків і обчислення коефіцієнта c з врахуванням заміни, отримаємо експоненціальне рівняння регресії параметра b :

$$b = e^{2,1\beta}. \quad (3.47)$$

З врахуванням (3.43) і (3.47) запишемо рівняння регресії, яке описує зміну точності вимірювання віддалі в безрефлекторному режимі для різних віддалей та кутів падіння променя:

$$m_D = 0,6 + 0,6\beta + e^{2,1\beta} \cdot D \cdot 10^{-5}. \quad (3.48)$$

В даній регресії коефіцієнт 0,6 є похибкою постійної поправки далекоміра (точність визначення коефіцієнта $m=0,01$); $0,6\beta$ – сума похибки реєстрація фази та похибки опорної напруги, які пропорційні куту падіння променя на відбиваючу поверхню (точність визначення коефіцієнта $m=0,2$); $e^{2,1\beta}$ – коефіцієнт, який враховує зміну відносної похибки масштабної частоти (точність визначення коефіцієнта $m=0,3$).

Для оцінки якості отриманої залежності, виконаємо оцінку точності визначення планових координат контрольних точок на трубопроводі, із застосуванням формули (3.48) при розрахунку похибки m_D . На відміну від поширеної залежності виду $m_D = \pm(a + b \cdot D)$, одержана формула враховує не лише довжину вимірюваної віддалі, але й кут падіння променя до поверхні на яку ведеться спостереження. Еліпси похибок, представлені на рис. 3.18, зображають співвідношення похибок визначення координат, розрахованих для апіорної і апостеріорної оцінок точності.

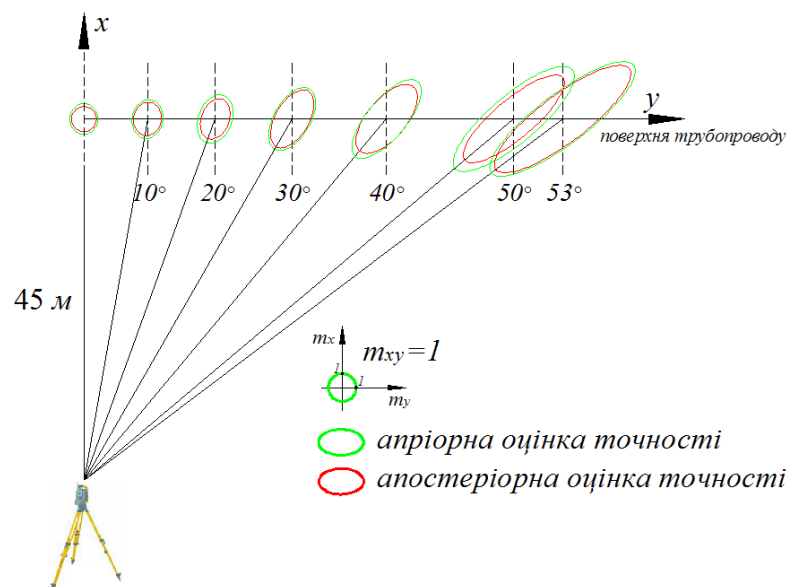


Рис. 3.18 Співвідношення еліпсів похибок для апіорної і апостеріорної оцінок точності

З рис. 3.18 бачимо, що застосування формули (3.48) дозволяє отримати достовірну величину похибки планових координат при виконанні апріорної оцінки точності.

3.3. Організація і техніка геодезичних спостережень за зміщеннями та осіданням надземних газопроводів

3.3.1. Оптимізація розташування станції електронного тахеометра для спостереження за зміщеннями осі трубопроводу

Оптимальне положення станції електронного тахеометра визначається максимальною довжиною ділянки трубопроводу, в межах якої можуть бути визначені координати деформаційних марок із заданою точністю. Використовуючи результати дослідів, описаних в пунктах 3.2.1 і 3.2.3, визначимо місця розташування станцій електронного тахеометра відносно трубопроводу.

В табл. 3.7 наведені результати визначення граничного кута роботи тахеометра в безрефлекторному режимі. У відповідності до вказаних даних, в межах роботи безрефлекторного режиму на віддалі 45 м тахеометр охоплює ділянку довжиною 62,5 м (рис. 3.19). Максимальна довжина візирного променя дорівнює 75 м.

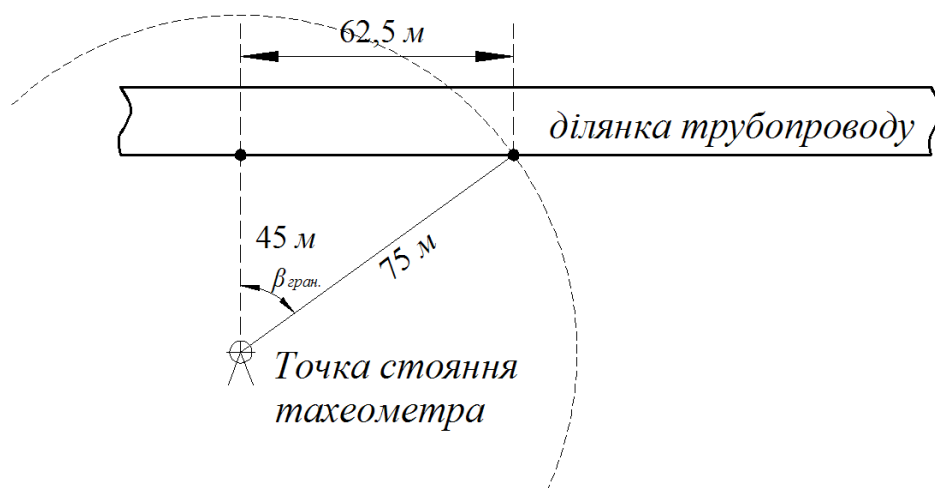


Рис. 3.19 Схема розташування приладу відносно трубопроводу

Виникає необхідність проаналізувати можливість збільшення довжини досліджуваної ділянки за рахунок збільшення віддалі від тахеометра до осі

труби. Зауважимо, що для зменшення впливу рефракції довжина візирного променя на повинна перевищувати 100м. Для цього використаємо дані дослідження безрефлекторного режиму тахеометра із застосуванням марки, яка імітує поверхню трубопроводу (табл.3.9). Згідно результатів дослідження, для візирного променя довжиною більше 75 м граничний кут повороту марки не перевищує 30°. Таким чином, розв'язуючи прямокутний трикутник, можемо обчислити віддалі від трубопроводу до тахеометра, а також довжини досліджуваних ділянок труби для візирних променів довжиною 80-100 м та граничного кута повороту марки 30°. Результати розрахунків наведемо в табл. 3.11.

Таблиця 3.11

**Результати обчислення довжини досліджуваної ділянки трубопроводу
(безрефлекторний режим)**

Довжина візирного променя, м	Віддаль від трубопроводу до тахеометра, м	Довжина ділянки трубопроводу, м
80	69,3	40,0
85	73,6	42,5
90	78,0	45,0
95	82,3	47,5
100	86,6	50,0

Закономірним є те, що із збільшенням віддалі від точки встановлення тахеометра до осі трубопроводу, довжина досліджуваної ділянки труби збільшується. Але для граничного кута повороту марки в 30° ця довжина не перевищує 50 м. Тому аналізуючи наведені дані, можемо зробити висновок про те, що оптимальна віддаль на якій потрібно встановлювати електронний тахеометр для роботи в безрефлекторному режимі дорівнює 45 м (рис. 3.19).

Використовуючи дані досліджень, побудуємо раціональні схеми розташування станцій електронного тахеометра вздовж осі надземного трубопроводу. Встановивши прилад на віддалі 45 м, безрефлекторний режим тахеометра дасть змогу визначати координати точок на ділянці трубопроводу довжиною близько 125 м. Точність визначення планових координат в крайніх

перерізах даної ділянки не перевищуватиме 5,8 мм (див. табл. 3.8). Таким чином, надземний перехід газопроводу може бути розділений на ділянки довжиною 125 м. Станція тахеометра знаходитиметься в середині кожної ділянки на віддалі 45 м від осі (рис. 3.20,а).

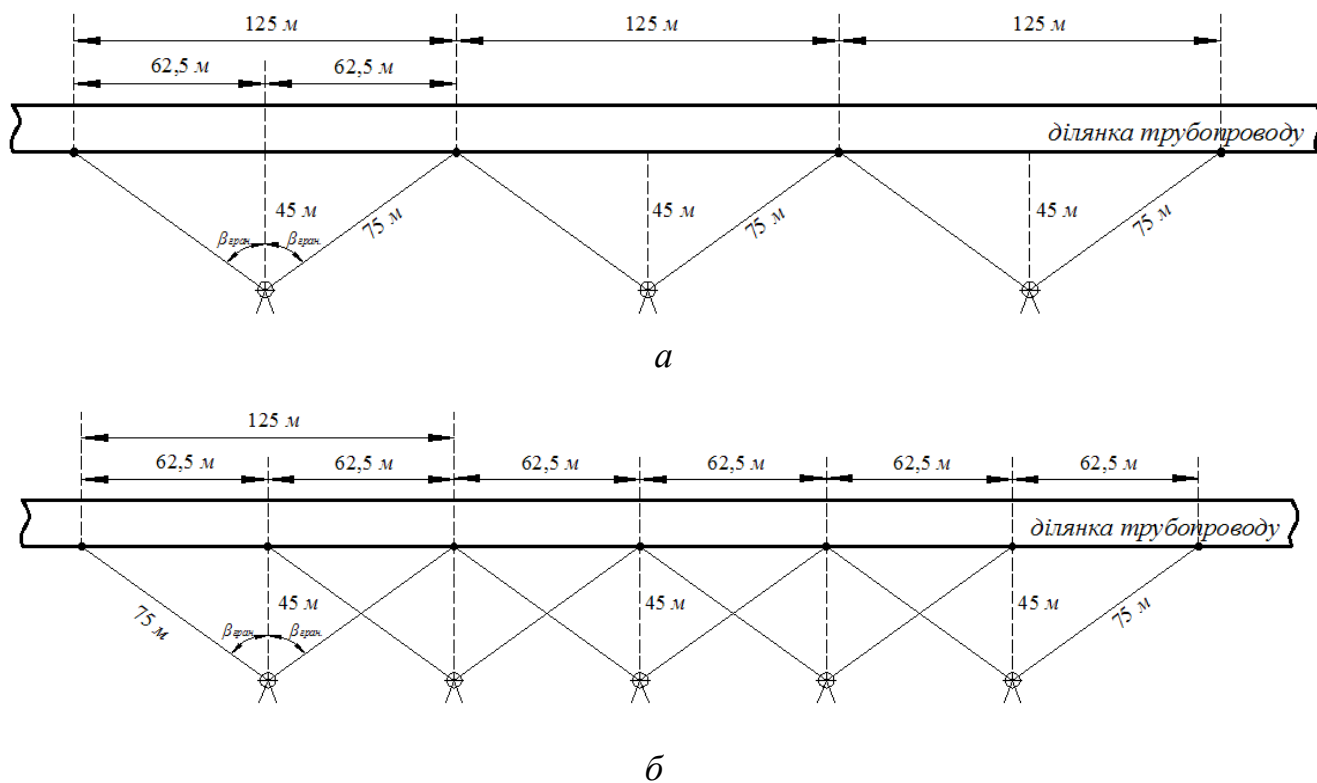


Рис. 3.20 Схема розташування станцій електронного тахеометра для роботи в безрефлекторному режимі

З метою отримання контролю та підвищення надійності визначення координат, наведення на деформаційні марки виконують з двох станцій. Для цього їх кількість необхідно збільшити вдвічі. Станції розташовують на віддалі 45 м від осі трубопроводу через 62,5 м (рис. 3.20,б). В такому випадку очікувана точність визначення координат збільшується в $\sqrt{2}$ рази. А її середня квадратична похибка становитиме $m_{xy} = 5,8/\sqrt{2} = 4,1$ мм.

Якщо в якості деформаційних марок замість марок для безрефлекторного режиму використовувати плівкові відбивачі, то принцип вибору місця станції залишається тим самим. Змінюються лише такі параметри як віддаль станції від трубопроводу та точність визначення координат. Для цього проаналізуємо дані досліджень точності визначення

координат плівкових відбивачів, наведених в табл. 3.6. Використовуючи значення граничного кута повороту площини плівкового відбивача відносно візирної лінії різної довжини, обчислимо віддалі від станції тахеометра до осі трубопроводу, а також довжини досліджуваних ділянок труби. Результати обчислень наведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12

**Результати обчислення довжини досліджуваної ділянки трубопроводу
(режим наведення на плівковий відбивач)**

Довжина візирного променя, м	Граничний кут повороту плівкового відбивача	Віддаль від трубопроводу до тахеометра, м	Довжина ділянки трубопроводу, м
25	75°	6,5	24,1
50	75°	13,0	48,5
75	60°	37,5	65,0
100	45°	70,7	70,7

З табл. 3.12 бачимо, що найдовша ділянка трубопроводу, довжиною 70м, доступна для знімання електронним тахеометром у випадку його розташування на віддалі 70 м. При цьому довжина візирного променя не перевищує 100 м, а граничний кут повороту плівкового відбивача становить 45°. Точність визначення віддалі до плівкового відбивача для різних кутів візування не перевищує теоретично розрахованого значення (див. табл. 3.6). Тому точність визначення координат буде вищою ніж для безрефлекторного режиму.

На рис. 3.21 зображено схеми розташування станцій електронного тахеометра для наведення на деформаційні марки, які закріплені плівковими відбивачами. Як і для безрефлекторного режиму, наведено дві схеми: рис.3.21, а – наведення на деформаційну марку з однієї станції; рис. 3.21, б – наведення на деформаційну марки з двох станцій.

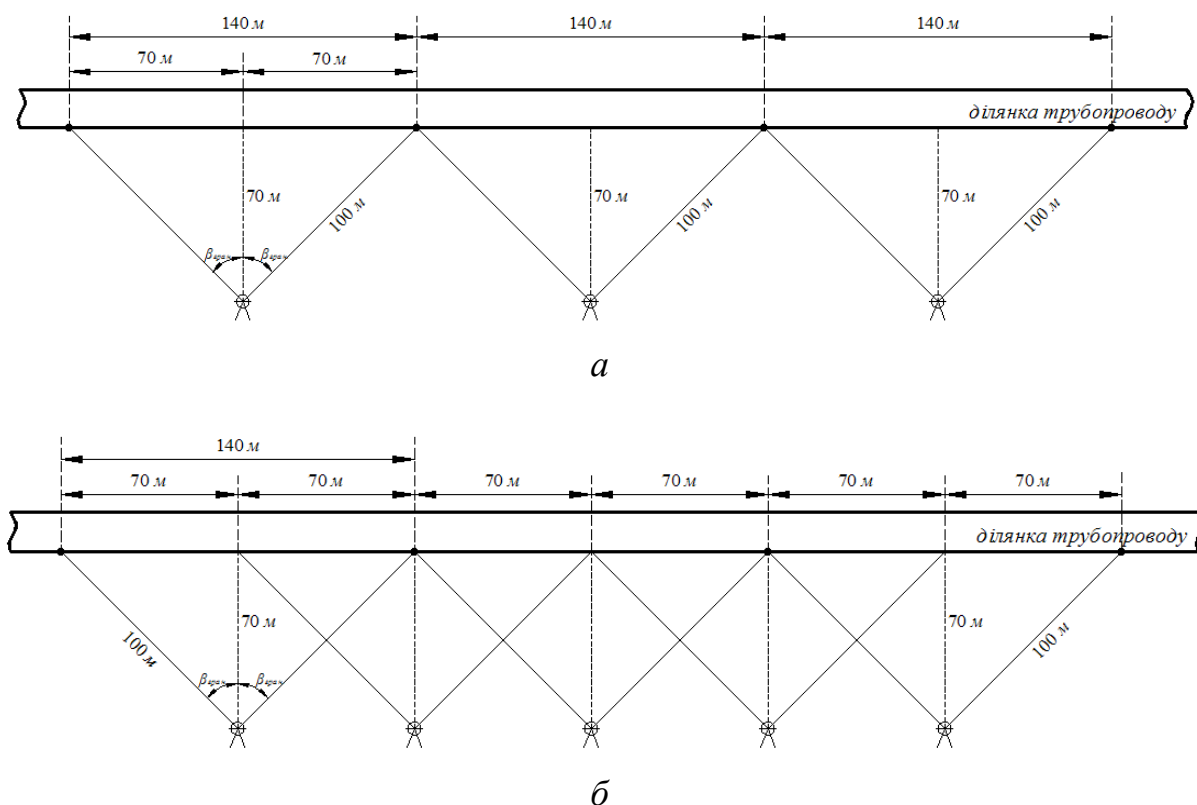


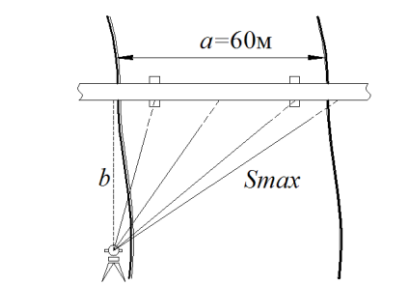
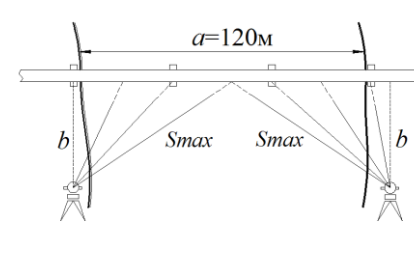
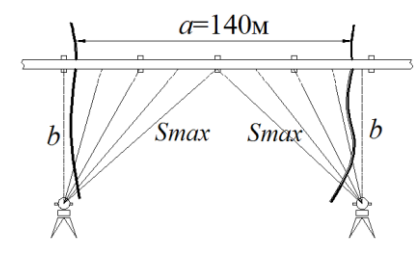
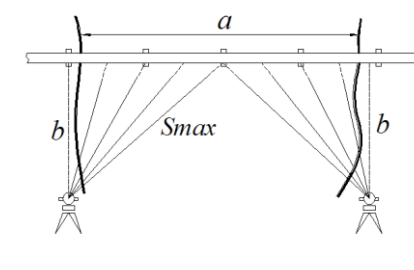
Рис. 3.21 Схема розташування станцій електронного тахеометра для наведення на плівкові відбивачі

Оптимальне розташування приладу для визначення висотних позначок деформаційних марок забезпечується за умови наближення висоти розташування марки до рівня горизонту приладу. Доцільно встановлювати станцію таким чином, щоб зенітний кут візування на марку прямував до 90° [78]. Для зниження впливу освітлення деформаційних марок сонячними променями, рекомендується встановлювати їх, а відповідно і прилад з північної (тіньової) сторони трубопроводу [11].

Схеми розташування станцій електронного тахеометра відносно перешкод, які перетинає трубопровід, представлено в табл. 3.13. Їх класифіковано в залежності від ширини перешкоди (річки або яру). Для більшості надземних переходів газопроводів, споруджених в Карпатському регіоні, ширина русла, яке він перетинає, не перевищує 140 м.

Таблиця 3.13

Схеми розташування станцій електронного тахеометра відносно перешкоди

Ширина перешкоди a , м	Віддаль від тахеометра до осі трубопроводу b , м	Максимальна довжина візирного променя S_{max} , м	Тип деформаційних марок	Схеми розташування станцій тахеометра
<60	45	75	Марка для наведення в безрефлекторному режимі вимірювань	
60-120	45	75	Марка для наведення в безрефлекторному режимі вимірювань	
120-140	70	98	Плівковий відбивач	
>140	>70	>100	Плівковий відбивач/призмий відбивач	

3.3.2. Методика вимірювань планового зміщення осі надземного трубопроводу із застосуванням електронних тахеометрів

Застосування електронних тахеометрів дозволяє суттєво спростити технологію знімання положення надземного трубопроводу. На відміну від методик розроблених для традиційних геодезичних приладів, використання сучасних тахеометрів з безрефлекторним режимом вимірювання забезпечує

оперативність виконання знімачів та безпеку виконавців, яка зв'язана з відсутністю необхідності встановлення призових відбивачів або рейок на трубопроводі.

Опорною мережею для спостереження за планово-висотними зміщеннями трубопроводу служать пункти вихідної основи. Особливості побудови мережі та центри, якими вони закріплюються описані в пункті 3.1.1. У якості деформаційних марок доцільно використовувати спеціальні візирні марки для наведення у безрефлекторному режимі (див. пункт 3.1.2), або плівкові відбивачі. Місця розташування марок на трубопроводі встановлюються згідно технічного проекту.

Зміщення деформаційних марок визначають відносно пунктів робочої основи. Їх прив'язка виконується способом оберненої засічки не менше ніж до трьох пунктів опорної мережі. Розташування пунктів робочої основи вибирають згідно рекомендацій, описаних в пункті 3.3.1. Тахеометр встановлюють на віддалі 45 м від осі трубопроводу для проведення спостережень в безрефлекторному режимі, або на віддалі 70 м для наведення на плівкові відбивачі.

Для визначення планового положення деформаційних марок найбільш перспективним є спосіб полярних координат, який реалізується в координатному режимі електронного тахеометра. Візування на кожну марку проводиться як мінімум з двох станцій. Точність визначення положення марок для такої схеми спостережень характеризується коваріаційною матрицею [56]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_p + \mathbf{K}_{ct} \quad , \quad (3.49)$$

де \mathbf{K}_p – коваріаційна матриця похибок деформаційних марок відносно станції; \mathbf{K}_{ct} – коваріаційна матриця похибок визначення положення станції. Елементи матриці \mathbf{K}_p характеризуються формулами оцінки точності полярної засічки, а для \mathbf{K}_{ct} формулами оцінки точності оберненої засічки. Для зручності використання запишемо вираз (3.49) без матриць:

$$m_X^2 = m_{Xcm}^2 + m_{Xp}^2,$$

$$m_Y^2 = m_{Ycm}^2 + m_{Yp}^2;$$

де m_X , m_Y – середні квадратичні похибки координат. Обмежимося значенням середньої квадратичної похибки планового положення точки, тоді:

$$m_{XY}^2 = m_{cm}^2 + m_p^2. \quad (3.50)$$

В способі полярних координат планове положення деформаційної марки визначається шляхом вимірювання горизонтального кута β та віддалі S . Точність даного методу визначають за формулами [78]

$$m_{Xp}^2 = m_S^2 \cos^2 \beta + S^2 \sin^2 \beta \frac{m_\beta^2}{\rho^2},$$

$$m_{Yp}^2 = m_S^2 \sin^2 \beta + S^2 \cos^2 \beta \frac{m_\beta^2}{\rho^2}. \quad (3.51)$$

де S – виміряна віддаль, β – виміряний горизонтальний кут, m_S , m_β – середня квадратична похибка визначення віддалі і горизонтального кута.

Для наближеної оцінки точності визначення координат станції використаємо формулу оберненої кутової засічки [84] з врахуванням похибки планового положення опорних пунктів ($m_{вих.} = 2\text{мм}$):

$$m_{cm}^2 = \frac{m_\beta^2}{4F^2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + m_{вих.}^2, \quad (3.52)$$

де F , σ_1 , σ_2 – відповідно значення площі і розміри двох сторін інвертного трикутника, які лежать навпроти виміряних кутів засічки.

Планове зміщення деформаційної марки визначають з різниці координат в поточному та початковому циклах спостережень. Тому точність визначення планових зміщень визначається за формулою

$$m_{\delta_{xy}} = m_{xy} \sqrt{2}. \quad (3.53)$$

Враховуючи формули (3.50)-(3.53), запишемо формулу для оцінки точності горизонтальних зміщень деформаційних знаків способом полярних координат:

$$m_{\Delta y} = \sqrt{2m_s^2 + 2\left(S \frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + 2m_{cm}^2} \quad (3.54)$$

Виконаємо розрахунок точності горизонтальних зміщень деформаційних знаків на прикладі надземного переходу газопроводу довжиною 230 м (рис.3.22).

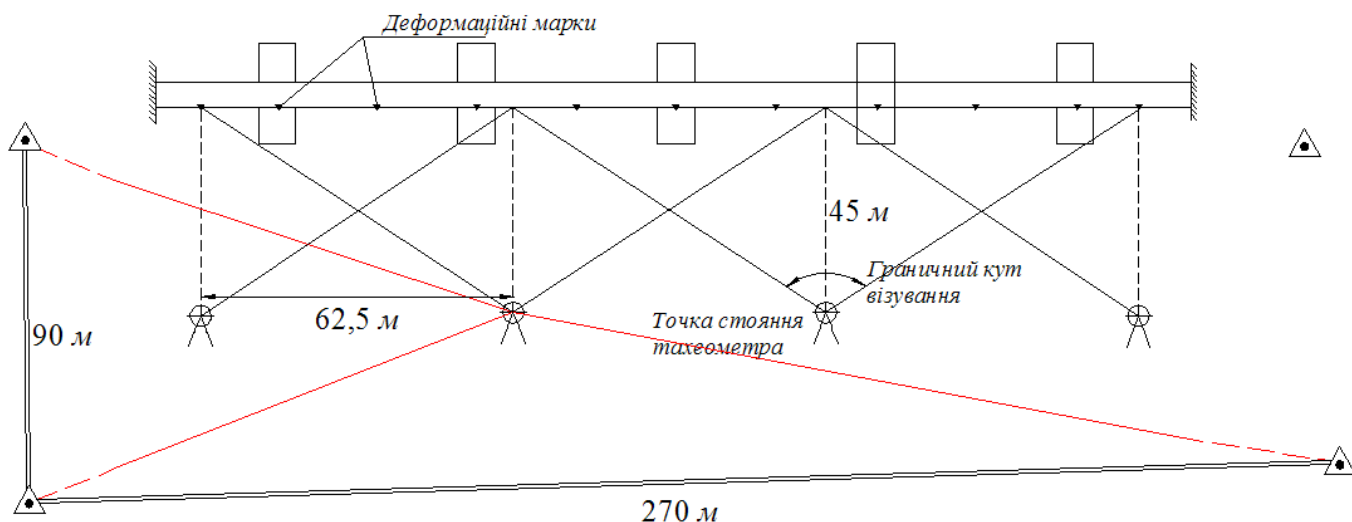


Рис. 3.22 Схема розташування станцій електронного тахеометра відносно надземного трубопроводу

Деформаційні марки закріплені візирними марками для наведення у безрефлекторному режимі тахеометра. Візування на кожну марку виконується з двох станцій, тому їх розташовують на віддалі 45 м від осі трубопроводу через 62,5 м. Координати кожної станції визначаються оберненою засічкою з пунктів опорної мережі. Розрахуємо точність визначення координат станції тахеометра за формулою (3.52). Для обчислень приймемо кутову точність тахеометра $m_\beta=5''$; точність пунктів опорної мережі $m_{вих.}=2$ мм; максимальні віддалі від тахеометра до пунктів опорної мережі $d_1=170$ м, $d_2=102$ м. Тоді $\sigma_1 = \rho''/d_1=1,21$; $\sigma_2 = \rho''/d_2=2,02$; $F \approx 0,5 \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1,22$.

$$m_{cm}^2 = \frac{m_\beta^2}{4F^2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + m_{вих.}^2 = \frac{5^2}{4 \cdot 1,22^2}(1,21^2 + 2,02^2) + 2^2 = 27,3; \quad m_{cm} = 5,2 \text{ мм}$$

Використовуюючи формулу (3.54), розрахуємо точність визначення горизонтальних зміщень найбільш віддаленої від тахеометра деформаційної марки ($S=75$ м, $m_S=3,2$ мм, $m_\beta=5''$):

$$m_{\delta_{xy}} = \sqrt{2m_S^2 + 2\left(S \frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + 2m_{cm}^2} = \sqrt{2 \cdot 3,2^2 + 2 \cdot \left(75000 \cdot \frac{5}{206265}\right)^2 + 2 \cdot 5,2^2} = 9 \text{ мм}$$

На основі застосованого алгоритму обчислено значення точності визначення планових зміщень найслабшої точки мережі. Приведений приклад лише ілюструє порядок обчислень. Для кожного окремого об'єкту схема мережі і точність приладів підбирається індивідуально таким чином, щоб забезпечити необхідну точність визначення координат, яка встановлюється проектною організацією.

Розроблена методика геодезичного контролю була успішно впроваджена фахівцями Управління проектно-кошторисних робіт філії УМГ “ХАРКІВТРАНСГАЗ” при проведенні топографо-геодезичних робіт з визначення просторового положення чотирьох надземних переходів на території Запорізького ЛВУМГ (акт впровадження приведений в додатку А).

3.3.3. Методика вимірювань вертикальних зміщень опор та осі надземного трубопроводу тригонометричним нівелюванням

Раніше високі вимоги до точності визначення висотного положення точок досягалися геометричним нівелюванням із застосуванням високоточних нівелірів та інварних рейок. Широке розповсюдження в інженерно-геодезичних роботах електронних тахеометрів, які забезпечують швидкість, автоматизацію та достатню точність вимірювань розширює можливості тригонометричного нівелювання.

Метод тригонометричного нівелювання, зокрема електронними тахеометрами, може забезпечити високу точність лише при виконанні певних умов. Як і для геометричного нівелювання, підвищення точності вимірювань осідань забезпечується тригонометричним нівелюванням коротким променем. Розрахунки показують [11], що для найнесприятливіших умов, які

характеризуються зміною коефіцієнта вертикальної рефракції в граничних межах (0,14-0,20), вплив рефракції на перевищення становить не більше 0,03 мм. Тому для малих віддалей (до 100 м) впливом за вертикальну рефракцію можна знехтувати. Якщо в геометричному нівелюванні дотримуються симетрії віддалей до рейок і стежать за стабільністю кута «*i*», то у тригонометричному нівелюванні стежать лише за стабільністю місця zenіту вертикального круга *MZ*. Вимірювання zenітних відстаней на станції виконують не менше як трьома прийомами. Критерієм якості вимірювання zenітних кутів є розходження між їх окремими значеннями в прийомах, яке визначається за формулою [11]

$$\Delta z = 2\sqrt{2}m_z \approx 3m_z,$$

де m_z – середня квадратична похибка вимірювання zenітного кута одним прийомом. Високу точність вимірювання перевищень на станції можна забезпечити лише для zenітних кутів z , близьких до 90° . Тому слід обмежувати висоту деформаційної марки і встановлювати її на рівні станції.

Для стабільності положення тахеометра з висотою достатньо надійно встановити прилад на штативі, а під час вимірювань використовувати зовнішню клавіатуру, яка допоможе уникнути зміщень приладу в момент натискання на клавіатуру.

Вимірювання віддалей виконується не менше як трьома прийомами. Під час вимірювання віддалей до марок необхідно враховувати поправки за метеоумови. Для зниження впливу зовнішнього середовища на результати нівелювання **не рекомендується** вести спостереження: у періоди з 10-ї до 16-ї години; під час коливання зображень, що ускладнює наведення на деформаційну марку; сильного і рвучкого вітру; сильних і стрибкоподібних коливаннях температури.

Як і для визначення планового положення деформаційних марок, точність висотного положення марки характеризується точністю визначення висоти марки одностороннім тригонометричним нівелюванням m_{hp} і

точністю визначення висоти станції тахеометра зі зворотної лінійно-кутової засічки $m_{h\text{ cm}}$:

$$m_h^2 = m_{hcm}^2 + m_{hp}^2 \quad (3.55)$$

Середня квадратична похибка висоти станції, визначена зворотною засічкою з трьох опорних пунктів, обчислюється за формулою [11]

$$m_{hcm} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z\right)^2 + m_l^2 + m_v^2}, \quad (3.56)$$

де m_s , m_z , m_l , m_v – точність визначення віддалі, зенітного кута, висоти приладу і візирної цілі.

Середня квадратична похибка перевищення для одностороннього тригонометричного нівелювання визначається за формулою [11]

$$m_{hp} = \sqrt{(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z\right)^2 + \left(\frac{S^2}{2R} \sin Z \cdot m_k\right)^2 + m_l^2 + m_v^2} \quad (3.57)$$

Деформаційні марки на трубопроводі та його опорах закріплюються плівковими відбивачами або марками для наведення в безрефлекторному режимі тахеометра. Тому висоти марок дорівнюють нулю ($m_v = 0$). Для довжин візирних променів до 100 м похибка визначення коефіцієнта рефракції m_k близька до нуля. Тоді (3.57) запишемо так:

$$m_{hp} = \sqrt{(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z\right)^2 + m_l^2} \quad (3.58)$$

Враховуючи формули (3.55)-(3.58), точність висотного положення деформаційної марки визначається за формулою

$$m_h = \sqrt{(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z\right)^2 + m_l^2 + m_{hcm}^2} = \sqrt{\frac{4}{3} \left[(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z\right)^2 + m_l^2 \right] + \frac{m_v^2}{3}} \quad (3.59)$$

Виконаємо розрахунок точності висотного положення деформаційної марки, використовуючи конкретні значення. Для тахеометра Sokkia 530RK похибка вимірювання віддалі $m_s = 3,2$ мм, похибка вимірювання зенітного кута одним прийомом $m_z = 5''$. Відповідно до схеми виконання знімання (рис. 3.22) максимальна довжина візирного променя $S = 75$ м. Для середньої висоти

трубопроводу над станцією тахеометра (5м) на віддалі 45м zenітна віддаль $z \geq 80^\circ$. Прийемо значення похибок визначення висоти приладу та візирної цілі на опорному пункті $m_I = m_V = 2\text{мм}$. Тоді за формулою (3.59):

$$m_h = \sqrt{\frac{4}{3} \left[(m_s \cos Z)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho} m_z \right)^2 + m_i^2 \right] + \frac{m_V^2}{3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4}{3} \left[(3,2 \cdot \cos 80^\circ)^2 + \left(\frac{75000 \cdot \sin 80^\circ}{206265} \cdot 5 \right)^2 + 2^2 \right] + \frac{2^2}{3}} = 3,4\text{мм} \quad (3.60)$$

З розрахунків бачимо, що точність визначення висотного положення марки залежить від точності електронного тахеометра, висоти розташування візирної марки, а також від кількості опорних пунктів з яких визначалася висота станції.

3.3.4. Методика розрахунку прогину осі надземного трубопроводу

На основі визначених планово-висотних координат деформаційних марок, закріплених на трубі, розраховують величину прогину трубопроводу.

Для обчислення стріли прогину f_i в прогоні (рис. 3.23) необхідно розрахувати віддалі d_i, d_n за значеннями планових координат. Кількість точок в прогоні для яких визначається стріла прогину та їх розташування визначається технічним проектом, розробленим проектною організацією.

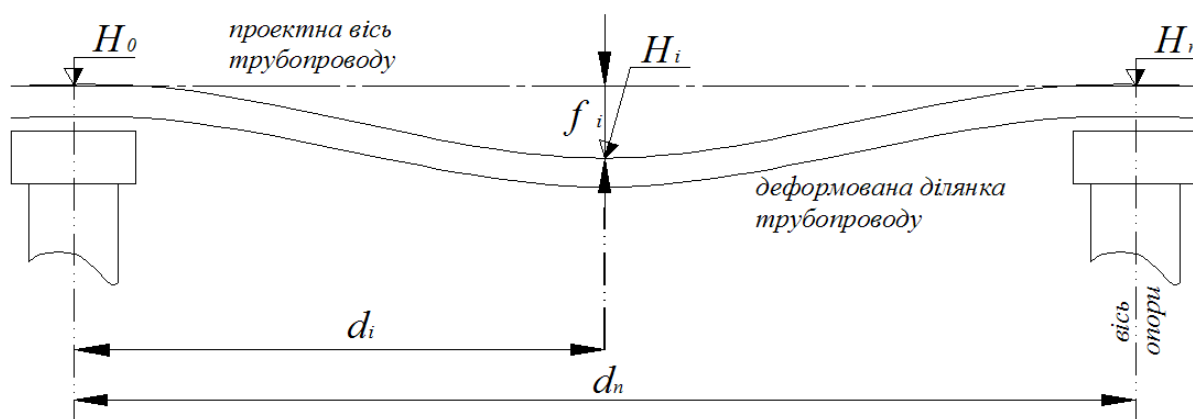


Рис. 3.23 Схема визначення стріли прогину надземного трубопроводу

Використовуючи значення висот марок в прогоні та опорних перерізах, стрілу прогину обчислюють за формулою [91]

$$f_i = H_0 + (H_n - H_0) \frac{d_i}{d_n} - H_i \quad (3.61)$$

де H_0, H_n, H_i – відмітки точок в опорних перерізах та в прогоні, d_i – віддаль від опорного перерізу до марки в прогоні, d_n – віддаль між опорами.

Для оцінки точності визначення стріли прогину згрупуємо елементи формули (3.61)

$$f_i = (H_0 - H_i) - (H_0 - H_n) \frac{d_i}{d_n}, \quad (3.62)$$

і введемо заміни:

$$\begin{aligned} h_i &= H_0 - H_i \\ h &= H_0 - H_n, \end{aligned}$$

де h, h_i – перевищення між відповідними деформаційними марками на трубопроводі. Тоді з врахуванням заміни (3.62) запишемо так:

$$f_i = h_i - h \cdot d_i \cdot d_n^{-1} \quad (3.63)$$

Шляхом диференціювання і подальшим переходом до середніх квадратичних похибок, отримаємо:

$$m_f^2 = \left(1 - \frac{d_i}{d_n}\right)^2 \cdot m_{\delta h}^2 + \left(\frac{h}{d_n^2} (d_i - d_n)\right)^2 \cdot m_d^2, \quad (3.64)$$

де $m_{\delta h}$ – середня квадратична похибка різниці висот марок, отриманих за результатами тригонометричного нівелювання, $m_{\delta h} = m_h \sqrt{2}$; m_d – середня квадратична похибка визначення віддалі між марками, $m_d = m_{\delta xy} = m_{xy} \sqrt{2}$, де m_{xy} – точність визначення планових координат марок.

Обчислимо значення середньої квадратичної похибки визначення прогину трубопроводу для марки розташованої в середині прогону, довжиною 40 м. Точність визначення планових і висотних координат марок приймемо у відповідності до розрахунків наведених в попередніх підпунктах:

$$m_{\delta h} = m_h \sqrt{2} = 3,4 \cdot \sqrt{2} = 4,8 \text{ мм}, \quad m_d = m_{xy} \sqrt{2} = 9 \text{ мм}.$$

Приймемо значення перевищення між марками на опорних перерізах $h=5$ мм. Тоді за формулою (3.64)

$$m_f = \sqrt{\left(1 - \frac{20}{40}\right)^2 \cdot 4,8^2 + \left(\frac{5}{40^2} (20 - 40)\right)^2 \cdot 9^2} = 2,5 \text{ мм}$$

Допустиме значення вертикального прогину трубопроводу залежить від довжини прогону d , і визначається за формулою [103]

$$f_{\text{дон}} = \frac{1}{K} d, \quad (3.65)$$

де $1/K$ – коефіцієнт, який залежить від матеріалу і конструктивних особливостей переходу; визначається в межах від $1/300$ до $1/800$. Виходячи з цього, допустима середня квадратична похибка визначення прогину:

$$m_f = 0,1 \cdot f_{\text{дон}} = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{300} \cdot 40000 = 13,3 \text{ мм}$$

Проаналізувавши результати розрахунків, бачимо, що точність визначення прогинів надземних переходів трубопроводів за значеннями планово-висотних координат деформаційних марок не перевищує допустимої величини.

3.3.5. Використання функції “визначення недоступної віддалі” електронного тахеометра для визначення зміни крену опор надземних трубопроводів

Вимірювання зміни крену опори електронним тахеометром виконують з двох станцій. Перед початком роботи прилад ретельно нівелюють. У верхньому і нижньому перерізі опори вибирають точки, за якими буде визначатися вектор крену l . Візування на марки виконується в безрефлекторному режимі тахеометра, або на закріплені плівкові відбивачі.

Після наведення на марку вимірюються нахилені відстані (S_1 , S_2), вертикальні кути і горизонтальний кут β (рис. 3.24). Вбудоване програмне забезпечення тахеометра, зокрема функція визначення недоступної віддалі, обчислює за виміряними даними горизонтальне прокладання D . Довжина вектора крену l визначається за формулою

$$l^2 = D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2 \cos \beta, \quad (3.66)$$

де D_1 , D_2 – горизонтальне прокладання вимірних віддалей S_1 , S_2 ; β – горизонтальний кут між напрямками візування.

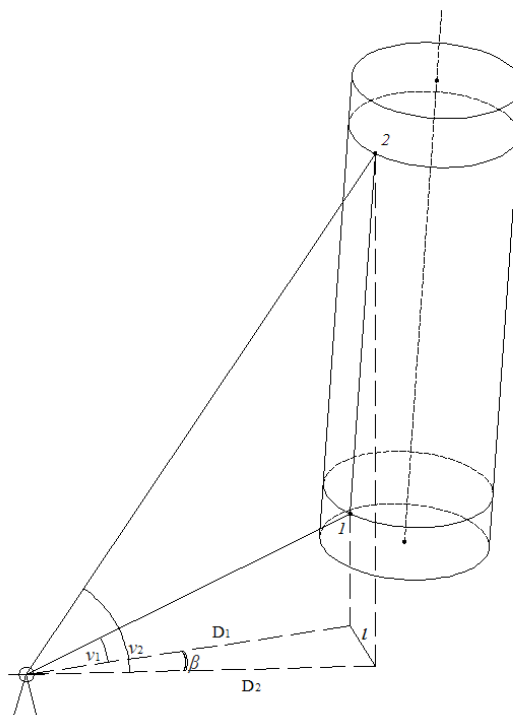


Рис. 3.24 Схема визначення крену опори електронним тахеометром

Напрямок вектора l визначає кут β : l буде з додатним знаком для кута, що збільшується вправо від точки 1 ; з від'ємним знаком для кута, що збільшується вліво. Обчислення (3.66) будуть виконані тахеометром автоматично, якщо вимірювання проводити в режимі визначення недоступної віддалі. Методика визначення довжини вектора l для тахеометрів фірми Sokkia в режимі визначення недоступної віддалі (ОНР):

- виконуємо візування на початкову точку 1 (нижній переріз опори). Нуль лімба орієнтують в напрямку точки 1 (подвійне натиснення клавіші УСТ 0);
- натискаємо клавішу РАССТ (виконання вимірювання);
- виконуємо візування на контрольну точку 2 (верхній переріз опори). Натискаємо клавішу ОНР.

На екрані приладу будуть видані значення: S – нахилена віддаль між точками 1 і 2 ; D – горизонтальна проекція S ; h – перевищення між точками 1 і 2 . Значення D являється довжиною шуканого вектора l . Його напрямку відповідає куту повороту аліади приладу між точками 1 і 2 .

Середня квадратична похибка визначення вектора крену l визначається за формулою [27]

$$m_l^2 = 2D^2(1 - \cos \beta)^2 \left(\frac{m_D}{l} \right)^2 + (D^2 \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{l \cdot \rho} \right)^2. \quad (3.67)$$

У виразі (3.67) вплив похибки лінійних вимірювань є слабким. Точність вимірювання кута β при визначенні крену перевіреною тахеометром буде вища аналогічного по точності теодоліта. Це зв'язане з відстеженням нахилу вертикальної осі обертання тахеометра та автоматичним врахуванням поправок за колімацію.

3.4. Висновки до розділу 3

Розраховано розміри геодезичного центру, який дозволить забезпечити стійкість пунктів опорної мережі у висотному положенні на рівні стандарту стійкості геодезичного знака $\sigma_y < 2-4$ мм.

Застосування деформаційних марок у формі бісектора забезпечує можливість наведення під гострим кутом без втрати точності за рахунок корегування віддалі між бісекторами. Форма марки не обмежує діапазон дії безрефлекторного режиму тахеометра під час вимірювання віддалі.

Визначено оптимальне положення станції тахеометра при виконанні спостережень у безрефлекторному режимі вимірювань (45 м від осі трубопроводу), та при застосуванні плівкових відбивачів у якості деформаційних марок (70 м від осі).

За результатами дослідження безрефлекторного режиму тахеометра, отримано аналітичну модель, яка показує залежність похибки вимірювання віддалі від кута падіння променя та довжини вимірюваної лінії. Її застосування дозволяє отримати достовірну величину похибки визначення віддалі для виконання апріорної оцінки точності.

Методика визначення просторового положення надземних трубопроводів впроваджена фахівцями Управління проектно-кошторисних робіт філії УМГ "ХАРКІВТРАНСГАЗ" при проведенні контролю технічного стану надземних переходів на території Запорізького ЛВУМГ.

ВИСНОВКИ

1. Проведено детальний аналіз геодезичних методів та засобів для контролю геометричних параметрів надземних переходів магістральних газопроводів. Встановлено ряд їхніх недоліків (неефективне використання людського та матеріального ресурсів; невідповідність нормам техніки безпеки; складність застосування в гірських умовах). Запропоновано застосування сучасних геодезичних приладів з можливістю проведення безконтактних вимірів.

2. Запропоновано формулу для розрахунку середньої квадратичної похибки спостережень за осіданням опор в будь-який момент експлуатації трубопроводу із врахуванням його просторової конфігурації.

3. Рекомендовано встановлювати точність спостереження за плановими зміщеннями надземних трубопроводів не вище 2,4 мм, з метою зниження впливу високочастотних коливань, викликаних температурними деформаціями.

4. Запропоновано оптимальне положення станції тахеометра відносно осі трубопроводу за визначеними граничними кутами падіння променя далекоміра до поверхні трубопроводу. З метою отримання достовірної величини апріорної оцінки точності, розроблено аналітичну модель похибок визначення віддалі у безрефлекторному режимі вимірювань.

5. Теоретично обґрунтовано і практично доведено ефективність застосування візирної марки у формі бісектора для наведення візирного променя під гострим кутом до її поверхні. Це дозволило виконувати наведення без втрати точності, не обмежуючи діапазон дії безрефлекторного режиму тахеометра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автахов З. Ф. Повышение эффективности использования балочных трубопроводных переходов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 25.00.19 – “Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ” / З. Ф. Автахов. – Уфа, 2004. – 23 с.
2. Адаменко О. В. Задачі геодезичних робіт при будівництві мостів / О. В. Адаменко // Інженерна геодезія. – 2011. – Випуск №57. – С. 5-10.
3. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
4. Айнбиндер А. Напряжено-деформированное состояние надземного трубопровода, имеющего различные формы начального искривления / А. Айнбиндер, С. Гильзин // Строительство объектов нефтяной и газовой промышленности. – ВНИИСТ, 1997. – С. 325-329.
5. Айнбиндер А. Анализ упругой и упруго-пластической работы надземных трубопроводов / А. Айнбиндер // Строительство трубопроводов. – 1983. – №7. – С. 16-21.
6. Арефьева Е. М. Об использовании аэрокосмических снимков для оценки состояния газопроводов / Е. М. Арефьева, Ю. Н. Петелин, Н. Н. Хренов // Геодезия и картография. – 1986. – № 8. – С. 27-29.
7. Афанасьев В. Оптические приборы и методы контроля прямолинейности в инженерной геодезии / В. Афанасьев, В. Усов. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
8. Балыкин М. К. Определение напряжений при температурном воздействии в трубопроводах Z-образной компенсации / М. Балыкин, В. Конючков // Изв. высш. учебн. заведений, Энергетика. – 1971. – №1. – С. 122-125.
9. Баран П. І. Врахування температурної деформації при вимірюванні горизонтальних і вертикальних зміщень інженерних споруд / П. І. Баран // Вісник геодезії та картографії. – 2007. – №4. – С. 14-20.

10. Баран П. І. Інженерно-геодезичні роботи в Україні / П. І. Баран, К. О. Бурак, В. Я. Ковтун // Вісник геодезії та картографії. – 2011. – №5. – С. 19-26.
11. Баран П. І. Тригонометричне нівелювання в інженерно-геодезичних роботах / П. І. Баран, Ф. Ф. Соловйов, В. Я. Чорнокінь. – К.: Укргеодезкартографія, 1996. – 130 с.
12. Барышпольский Е. Расчет трубопроводов на температурные воздействия / Е. Барышпольский // Ст-во трубопроводов. – 1968. – №1. – С. 20-22.
13. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений / Василий Дмитриевич Большаков. – 2-е изд. – М.: Недра, 1983. – 223 с.
14. Бородавкин П. П. Диагностика трубопроводных геотехнических систем в сложных физико-географических условиях / П.П. Бородавкин, Н.Н. Хренов, С. А. Егурцов // Обз. информация. Серия “Транспорт и подземное хранение газа”. – М.: ВНИИЭгазпром. – 1990. – 124 с.
15. Бородавкин П. Сооружение магистральных трубопроводов / П. Бородавкин, В. Березин. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
16. Боровий В.О., Буравлев Є.П., Бурачек В.Г., Крисенко М.П. Патент на винахід «Система контролю просторового положення елементів конструкцій магистральних нафтогазопроводів» № 84605 від 10.11.2009 р. Бюл. №1.
17. Бурак К. О. Визначення точності відхилення положення близькостворної точки за допомогою електронного тахеометра / К. О. Бурак, М. Я. Гринішак, В. М. Ковтун // Вісник геодезії та картографії. – 2012. – №2. – С. 15-17.
18. Бурак К. Е. Геодезические наблюдения за оползнями на трассе газопровода “Братство” / К. Е. Бурак // Геодезия и картография. – №7. – 1980. – С. 21-27.
19. Бурак К. Експериментальне дослідження впливу вібрації на результати високоточного нівелювання коротким променем цифровим нівеліром SDL30M / К. Бурак, О. Шпаківський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – №2 (22). – С. 134-135.

20. Бурак К. Е. К выбору методики геодезических наблюдений за напряженно-деформированным состоянием трубопроводов на оползневых участках / К. Е. Бурак // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1980. – №17. – С. 107-111.
21. Буш В. В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа / В. В. Буш, В. В. Калугин, А. И. Саар. – М.: Недра, 1985. – 216с.
22. Видуев Н. Геодезические измерения при установке машин и оборудования / Н. Видуев, Д. Ракитов, В. Гржибовский. – М.: Недра, 1967. – 168 с.
23. Войтенко С. Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування / С. Войтенко, Р. Шульц, М. Білоус // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – № 1(17). – С.144-150.
24. Войтенко С. Геодезичне забезпечення влаштування покрівлі НСК «Олімпійський» / С. Войтенко, Р. Шульц // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2010. – № 1 (19). – С. 185-192.
25. Войтенко С. П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів / Войтенко Степан Петрович. – К.: Вид-во Бучасової С.Г., 2003. – 215 с.
26. Войтенко С. П. Тенденції використання багатовимірного розподілу при аналізі результатів геодезичних вимірювань / С.П. Войтенко, М.В. Білоус // Інж. геодез. – 2008. – Вип. 54. – С. 27-32.
27. Ворошилов А. П. Спутниковые системы и электронные тахеометры в обеспечении строительных работ: Учебное пособие / А. П. Ворошилов. – Челябинск.: АКСВЕЛЛ, 2007. – 163 с.
28. Ганьшин В. Н. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженко, А. Г. Ильин. и др. – М.: Недра, 1981. – 215 с.

29. Герасимов В. Концепция геодезического мониторинга деформационных процессов в условиях заполярья / В. Герасимов, В. Лобазов, Б. Резник // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С.17-21.
30. Глотов В. Аналіз методів створення фронтальних планів лазерним наземним скануванням та цифровим зніманням / В. Глотов, Х. Марусаж // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - Львів, 2013. – Вип. 78. - С. 30-37.
31. Грицюк Т. Ю. Геодезичний моніторинг короткоперіодичних зміщень напірних трубопроводів гідроенергетичних об'єктів (на прикладі Терембле-Ріцької ГЕС): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.24.01 – «Геодезія, фотограмметрія та картографія» / Т.Ю. Грицюк. – Львів, 2010. – 22 с.
32. Грицюк Т.Ю. Методика опрацювання кінематичних мереж на прикладі напірного трубопроводу Терембле-Ріцької ГЕС / Грицюк Т.Ю., Третяк К.Р.// Геодезія, картографія та аерофотознімання. – Вип. 69. Львів –2009, с. 78-83.
33. Грицюк Т.Ю. Моніторинг напружень напірного трубопроводу Терембле-Ріцької ГЕС / Грицюк Т.Ю., Третяк К.Р. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Вип. II (15). Львів – 2008, с. 146-157.
34. Гуляев Ю. П. Анализ подходов к обоснованию точности геодезических наблюдений за деформационными процессами / Ю. П. Гуляев // Геодезия и картография. – № 8. – 2007. – С. 11-15.
35. Гуляев Ю.П. Имитационный подход к обоснованию точности геодезического контроля за деформациями сооружений / Ю.П. Гуляев, Л.А. Максименко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – № 1 /том 1/.
36. Гуляев Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений / Ю.П. Гуляев. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.
37. Гуревич М. М. Фотометрия. Теория, методы и приборы / М.М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272с.

38. Даниленко Т. С. Геодезические работы при создании комплексов инженерных объектов / Даниленко Тимофей Сергеевич. – М: Недра, 1985. – 223 с.
39. Деймлих Ф. Радиогеодезические и электрооптические измерения / Ф. Деймлих, В. Большаков, А. Голубев, В. Васильев. – М.: Недра, 1985. – 303 с.
40. Дем'яненко Р. А. Методика діагностики кондиційності геометричних параметрів ліфтових шахт / Р.А. Дем'яненко // Вісник геодезії і картографії. – 2007. – №3. – с 14-18.
41. Дильман В. Л. О потере пластической устойчивости деформирования трубопроводов / В. Л. Дильман // Известия Челябинского научного центра. – 2000. – вып. 2(7). – с.4-7.
42. Егурцов С. А. Выявление по материалам аэрофотосъемки потенциально опасных участков и определение их напряженно-деформированного состояния / С. А. Егурцов, Н. Н. Хренов // Нефтяная и газовая промышленность. Сер. Транспорт и хранение нефти. – 1990. – № 8. – С. 4-8.
43. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий/Б.Н. Жуков – Новосибирск: СГГА,2003. –356 с.
44. Жуков Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации / Б.Н. Жуков . – Новосибирск: СГГА, 2004. – 376 с.
45. Завьялов А. П. Совершенствование методов оценки технического состояния технологических трубопроводов по результатам диагностирования: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / А. П. Завьялов. – Москва, 2006. – 22 с.
46. Зазуляк П. М. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань / П.М.Зазуляк, В.І. Гавриш, Е.М. Євсєєва, М.Д. Йосипчук. – Львів: Видавництво “Растр-7”, 2007. – 408 с.

47. Заміховський Л. М. Математичний апарат для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів при зміні їх просторового положення / Л. Заміховський, А. Олійник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – 306 с.
48. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. – М., Недра, 1990. – с.167
49. Канашин Н. Опыт применения наземного лазерного сканирования для топографических съемок линейных сооружений / Н. Канашин, К. Виноградов, Д. Степанов // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. - Випуск 2 (22). - С. 147-149.
50. Канашин Н. Съемка железнодорожных станций методом лазерного сканирования / Н. Канашин // Путь и путевое хозяйство. -2008.-№ 7.- С.15-16.
51. Киссам Ф. Оптические приборы для точных измерений крупногабаритных изделий / Ф.Киссам. – М.: Машиностроение, 1966. – 136 с.
52. Кичма А. О. Комп'ютерне моделювання та розрахунок довгомірних надземних переходів магістральних газопроводів / А. О. Кичма, В. М. Гелетій, Я. М. Новіцький // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2010. – № 678: – С. 55-60.
53. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
54. Костецька Я.М. Визначення висот об'єктів лінійних споруд супутниковим методом / Я.М. Костецька // [Електронний ресурс] – доступ до ресурсу: http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/Visnyk-Lvivskogo-Nats-agrar-univer/APK/2010_1/files/10kybasm.pdf
55. Костецька Я. М. Геодезичні прилади. Частина 2. Електронні геодезичні прилади / Костецька Яромира Михайлівна. – Львів, 2000. – 322 с.
56. Коугия В. А. Геодезические работы при строительстве мостов / В.А.Коугия, В. В. Грузинов, О.Н. Малковский, В. Д. Петров. – М.: Недра, 1986. – 248 с.

57. Кузьменко Е. Прогноз розвитку зсувних процесів як фактор забезпечення надійної експлуатації трубопроводів / Е. Кузьменко, Є. Крижанівський, О. Карпенко, О. Журавель // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. - №4 (17). – С. 24-35.
58. Кузнецов А. И. Определение зависимости систематической погрешности измерения расстояний от угла раз ворота пленочного отражателя / А. И. Кузнецов, С. А. Моисеенко, М. С. Савин // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2011. – № 3 (17).
59. Кухтар Д. В. Використання електронного тахеометра при роботі у безрефлекторному режимі для спостережень за переміщеннями надземних переходів магістральних газопроводів / Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід, VII міжнар. наук.-практ. конф. – Чернігів, 2011. – С. 59-64.
60. Кухтар Д. В. Вплив температури ґрунту на висотне положення реперів / І.С. Тревого, Є.Ю. Ільків, Д.В. Кухтар, С.І. Досин // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – №2 (24). – С. 48-50.
61. Кухтар Д. В. Геодезический мониторинг надземных магистральных газопроводов в карпатском регионе / И. С. Тревого, Е. Ю. Илькив, Д. В. Кухтар // Геопрофи. – 2013. – № 2. – С. 46-48.
62. Кухтар Д. Допустима точність електронного тахеометра для визначення вертикальних зміщень опор надземних трубопроводів / І. Тревого, Є. Ільків, Д. Кухтар // Тези доповідей міжнародної наук.-практ. конф. «Геоінформаційний моніторинг. GPS і ГІС технології». – Алушта, 2012. – С. 143-146.
63. Кухтар Д. В. Дослідження температурних деформацій надземних трубопроводів методом кореляційного аналізу / І. С. Тревого, Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Вісник геодезії та картографії. – 2013. – №2. – С. 12-15.
64. Кухтар Д. В. Дослідження точності геодезичного контролю балкових переходів магістральних газопроводів при роботі електронним тахеометром у безрефлекторному режимі / Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Безпека об'єктів

нафтогазового комплексу, Всеукр. наук.-практ. конф., 5-7 жовт. 2011р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011.

65. Кухтар Д. В. Методика контролю температурних деформацій надземних переходів магістральних газопроводів / І. С. Тревого, Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Вісник геодезії та картографії. – 2011. – №6. – С. 6-9.

66. Кухтар Д. Обґрунтування точності геодезичних робіт для визначення вертикальних зміщень опор надземних трубопроводів / Є. Ільків, Д. Кухтар, О. Ванчура // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – №1 (25). – С. 55-57

67. Кухтар Д. В. Оперативний контроль геометричних параметрів надземних переходів магістральних газопроводів фотограмметричним методом / Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу, міжнар. наук.-практ. конф., 15-18 трав. 2012 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012.

68. Кухтар Д. В. Особливості виду контрольних марок для спостереження за зміщеннями надземних переходів магістральних газопроводів / І. С. Тревого, Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Вісник геодезії та картографії. – 2012. – № 1. – С. 5-8.

69. Кухтар Д. Особливості визначення просторового положення надземних переходів магістральних газопроводів з використанням електронного тахеометра у безрефлекторному режимі / І. Тревого, Є. Ільків, Д. Кухтар // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – №2 (22). – С. 124-128.

70. Кухтар Д. В. Точность геодезических работ для определения вертикальных смещений опор деформированных участков надземных трубопроводов / И.С. Тревого, Е.Ю. Илькив, Д.В. Кухтар // Геодезия и картография. – 2013. – №7. – С. 5-7.

71. Кухтар Д. Удосконалення методики нівелювання цифровим нівеліром / І. Тревого, Є. Ільків, Д. Кухтар // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – №1 (23). – С. 96-97.

72. Ламбин В. Исследование особенностей измерения расстояний при наблюдениях на пленочные отражатели / В. Ламбин // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – № 2 (22). – С. 119-123.
73. Лобачев В. М. Радиоэлектронная геодезия / В.М. Лобачев. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
74. Левчук Г.П. Прикладная геодезия / Г. Левчук, В. Новак. – М.: Недра, 1981. – 437 с.
75. Магистральные трубопроводы: СНИП 2.05.06-85. – М.: ЦИТП Госстроя, 1985. – 125 с.
76. Мазур И. Безопасность трубопроводных систем / И. Мазур, О. Иванцов. – М.: ИЦ Елима, 2004. – 1104 с.
77. Марахтанов В. П. Оценка технического состояния северных газопроводов по материалам аэрофотосъемок / В. П. Марахтанов, Н. Н. Хренов // Строительство трубопроводов. – 1984. – № 8. – С.35-36.
78. Марибэль Прос Строительство канала 21 века [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/TruStories/Building%20the%20Canal%20of%20the%2021st%20Century%20TRU_ru.pdf
79. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений: МДС 13-22.2009. – М.: ООО “Тектоплан”, 2010.
80. Методика оценки работоспособности балочных переходов магистральных газопроводом через малые реки, ручьи и другие препятствия: ВРД 39-1.10-016-2000. – [Чинний від 2000-12-01]. – М.: Информационно-рекламный центр газовой промышленности, 2000.
81. Михелев Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений / Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов. – М: Недра, 1977. – 152 с.
82. Морозов В. Н. Магистральные трубопроводы в сложных инженерно-геологических условиях / В. Н. Морозов. – Л. : Недра, 1987. - 122 с.

83. Назаров И. А. Разработка и исследование современных технологий геодезических обмерных работ при воссоздании живописного облика храма Христа Спасителя: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.32 – «Геодезия» / И. А. Назаров. – Москва, 2007. – 23 с.
84. Нестеренко М. С. Особенности определения деформаций арок покрытия велодрома спортивно-развлекательного комплекса «Минск-Арена» [Электронный ресурс] / М.С. Нестеренко // – доступ до ресурсу: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/5b6d14ee-4b2f-48a2-8256-dfb2b71d2524/Osobennosti-opredelenya-deformation.aspx>
85. Олійник А. П. Математичне моделювання теплофізичних процесів в трубопроводах з урахуванням неоднорідності матеріалу при конвективно-променевому теплообміні / А. П. Олійник, О. Я. Івасів // Штучний інтелект. – 2005. - № 3. – с.194-200.
86. Олийнык А. Оценка влияния факторов аэродинамического воздействия на аварийные участки магистральных трубопроводов / А. Олийнык, Л. Замиховский, А. Герман // Методы и средства технической диагностики: сб. научных статей / Мар.гос.ун-т. – Йошкар-Ола,2002. – Вып.ХІХ . – С. 127-131.
87. Перович Л. Н. Разработка методов и средств геодезического контроля деформаций инженерных сооружений магистральных газопроводов: автореф. дис. на соискание уч. ступени д. техн. наук: спец. 05.24.01 – «Геодезия» / Л. Н. Перович. – Львов, 1990. – 42 с.
88. Перун Й. В. Магистральные трубопроводы в горных условиях / В. Н. Перун. – М. : Недра, 1982. - 175 с.
89. Петров И. П. Надземная прокладка трубопроводов / И. Петров, В. Спиридонов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1973. - 477 с.
90. Пічугін С. Ф. Розрахунок надійності сталевого магістрального трубопроводу / С. Ф. Пічугін, О. Є. Зима // Збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку академічної та університетської науки», 16–18 грудня 2009 р. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С. 210 – 214.

91. Положение по техническому обследованию и контролю за состоянием надземных переходов магистральных газопроводов: ВСН 39-1.10-003-2000. – [Чинний від 2000-12-01]. – М.: Информационно-рекламный центр газовой промышленности, 2000.
92. Проворов К. Л. Радиогодезия. Изд. 2, испр. и доп. / К.Л. Проворов, Ф.П. Носков. – М.: Недра, 1973. – 352 с.
93. Резник Б. Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений / Б. Е. Резник // Геопрофи. – 2008. – № 4. – С. 4-10.
94. Рекомендации по прогнозированию деформаций сооружений гидроузлов на основе результатов геодезических наблюдений: П 53-90. – [Чинний від 15-06-1990]. – Л., 1990.
95. Рекомендации по учету динамических ветровых нагрузок при расчете балочных систем надземных трубопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1975. – 74 с.
96. Самойленко О. Апроксимація поверхонь динамічних об'єктів сумісно з вирівнюванням результатів геодезичних вимірювань з урахуванням їхніх похибок та похибок вихідних даних / О. Самойленко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. I(21). – С. 80-85.
97. Семко О. Методика експериментальних досліджень впливу температури атмосферного повітря на елементи відкритих металевих конструкцій / О. Семко, В.Пашинський // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. — К.: "Техніка", 2009. — Вып. 90: Серия: Архитектура и технические науки. – С. 164-168.
98. Симонян В.В. Сравнительный анализ методов створных измерений с целью оценки применимости этих методов для геодезического мониторинга протяженных объектов / В. В. Симонян, А. В. Лабузнов, Н. В. Ангелова, и др.// Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». – 2011. – № 3. – С. 22-30.

99. Сідоров І.С. Сумісне опрацювання супутникових і наземних геодезичних вимірів високоточної мережі будівництва Дністровської ГАЕС/ І.С. Сідоров, К.Р. Третяк // Вісник геодезії та картографії. – 2012. – №3. – С.6-9
100. Спиридонов А. И. Теодолиты / А. И. Спиридонов. – М.: Недра, 1985. – 200 с.
101. Стенина Т. Е. Квазистатическое состояние и динамические возмущения надземных магистральных трубопроводов : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / Т. Е. Стенина. – Москва, 2009. – 22 с.
102. Стрілецький Ю. Й. Моніторинг положення осі трубопроводу // Ю. Й. Стрілецький / Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 21. – с.48-51.
103. Субботин И. Е. Инженерно-геодезические работы при проектировании, строительстве и эксплуатации магистральных нефтегазопроводов / И. Е. Субботин. – М.: Недра, 1987. – 140 с.
104. Тарасенко М. І. Методика визначення технічних параметрів електронних тахеометрів при роботі у безвідбивачевому режимі/ М. І.Тарасенко, А. Г.Тіщенко // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – вип. 72. – с.54-61.
105. Тахеометр SOKKIA SET30RK /Інструкція з користування. – 99 с.
106. Тихонова И. А. К вопросу о деформациях магистральных трубопроводов / И. А. Тихонова / Инженерная геодезия. – 1977. – вып. 20 – С.38-41.
107. Тревого І. С. Проблеми побудови планових геодезичних мереж у містах та методи їх вирішення: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: спец. 05.24.01 – «Геодезія» / Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 1999. – 34 с.
108. Тревого І. Сучасні тенденції розвитку і класифікації електронних тахеометрів / І. Тревого, А. Баландюк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. - випуск І (17).
109. Третяк К. Моніторинг напружень напірного трубопроводу Тербля-Рікської ГЕС геодезичними методами / К. Третяк, Т. Грицюк // Сучасні

досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2008. – №1 (15). – С. 146-156.

110. Третьак К. Оцінка точності параметрів деформацій напірних трубопроводів / К. Третьак, К. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – №1 (23). – С. 115-119.

111. Успенский М. С. Условия устойчивости геодезических центров и реперов / М. С. Успенский. – М.: Геодезиздат, 1955. – 95 с.

112. Фролов А. В. Безопасность воздушных переходов магистральных газопроводов после длительной эксплуатации: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 25.00.19 – “Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ” / А. В. Фролов. – Уфа, 2010. – 27 с.

113. Хренов Н. Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования / Н. Хренов. – М.: Газоил пресс, 2005. – 608 с.

114. Хренов Н. Н. Концепция применения аэрокосмических методов для диагностирования магистральных трубопроводов и мониторинга окружающей среды / Н. Н. Хренов, С. А. Егурцов // Диагностика оборудования и трубопроводов – М.: ИРЦ Газпром. НТС. – 1995. – № 3.

115. Чеботарев А. С. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей / Чеботарев Александр Степанович. – М. : Недра, 1958. – 606 с.

116. Чибіряков В. К. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації опор мостових переходів / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Інженерна геодезія. – 2008. – Випуск №54. – С. 238-248.

117. Чибіряков В. К. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації прогінних конструкцій мостових переходів / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Містобудування та територіальне планування. – 2008. – Випуск №31. – С. 20-24.

118. Чибіряков В.К. Дослідження точності моделювання осадок ґрунтових основ при моніторингу інженерного середовища / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, З. М. Кравченко // Інженерна геодезія. – 2011. – Випуск №57. – С. 56-68.
119. Чибіряков В. К. Загальний підхід до моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу лінійних споруд / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, К. О. Нікітенко // Інженерна геодезія. – 2011. – Випуск №57. – С. 68-80.
120. Шевердин П. Геодезический контроль за деформациями газопроводом на оползневых участках трассы // П. Шевердин / Инженерная геодезия. – 1978. – вып. 21. – с.62-67.
121. Шейнер М. Я. Опыт автоматизации геодезических работ при строительстве транспортных эстакад / М. Я. Шейнер, С. М. Рогов, В. Ю. Волгин // Геопрофи. – 2003. – № 4. – С. 6-9.
122. Шеховцов Г. А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография / Г. А. Шеховцов, Р. П. Шеховцова; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т – Н.Новгород: ННГАСУ, 2009.– 156 с.
123. Шлапак Л. С. Анализ перемещений надземных переходов балочного типа / Л. С. Шлапак // Нефт. и газ. пром.-сть. – 1990. – № 1. – С. 34-36.
124. Шлапак Л. С. Исследование напряженно-деформированного состояния сложных участков трубопроводов в условиях Карпат с целью повышения их эксплуатационной надежности / Л. С. Шлапак // Методы и средства технической диагностики. – Ивано-Франковск, 1992. – С. 134-137.
125. Шлапак Л. С. Науково-методичні основи діагностики напружено-деформованого стану надземних дільниць газопроводів: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Шлапак Любомир Степанович. – Івано-Франківськ, 1996. – 423 с.

126. Шлапак Л. С. Обґрунтування вибору базових точок при геодезичних дослідженнях надземних переходів / Л. С. Шлапак, А. П. Олійник // Розвідка і розробка нафт. і газ. родовищ: Міжвід. зб. – Львів: Вища школа. – 1990.
127. Штаєр Л. О. Моделювання аеродинамічних впливів на ділянки трубопроводів, що експлуатуються в гірських умовах / Л. О. Штаєр // Вісник КрНУ ім. М.Остроградського. – 2011. – Вип. № 4(69). – С. 94-96.
128. Шульц Р. В. Инженерно-геодезическое обеспечение строительства стадиона в г. Львове / Р. В. Шульц, Н. В. Белоус, В. Я. Ковтун, и др. // Геопрофи. – 2012. – № 5. – С. 22-25.
129. Шульц Р. Мобільні комплекси лазерного сканування залізничних колій / Р.В. Шульц // Вісник геодезії та картографії. – 2012. – № 2. – С. 9-14.
130. Шульц Р. В. Технологія визначення геометричних параметрів ліфтових шахт з використанням електронних тахеометрів / Р. В Шульц, Р. А. Дем'яненко // Інженерна геодезія. – 2008. – Випуск №54. – С. 321-326.
131. Ashraf A. Investigating the accuracy of digital levels and reflectorless total stations for purposes of geodetic engineering/ Ashraf A., Islam M. – Alexandria Engineering Journal. – Volume 50, Issue 4, December 2011, Pages 399–405.
132. Armstrong-Helouvry B., Dupont P., Canudas de Wit C. A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for Control of Machines with Friction // *Automatika*, 1994. Vol. 30. – № 7. – P. 1083-1138.
133. Banica A. Detection flying high / Adrian Banica // [Електронний ресурс] – доступ до ресурсу: <http://www.synodon.com/wp-content/uploads/2013/03/May-2013-World-Pipelines-Detection-Flying-High.pdf>
134. Brikman G. A. Analysis of Ostankino tower body movements under influence of the temperature factor / G. A. Brikman // *Mast and towers for Radio and television*. – 1981. – Book 2. – p. 182-192.
135. Cosser E. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station / Emily Cosser, Gethin W Roberts, Xiaolin Meng, Alan H Dodson // *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.*

136. Dieter Hausamann, Monitoring of gas pipelines – a civil UAV application / D. Hausamann, W. Zirrig, G. Schreier, P. Strobl // Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 77 Iss: 5, pp.352 – 360.
137. Felix Y. Yokel. Earthquake resistant construction of gas and liquid fuel pipeline systems serving, or regulated by, The Federal Government / Felix Y. Yokel, Robert G. Mathey. – Federal emergency management agency. – Washington DC, USA. - 1992.
138. Gairns C. Development of Semi-Automated System for Structural Deformation Monitoring Using a Reflectorless Total Station/ C. Gairns – M.Sc. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 2008, 118p.
139. Huaan Fan. Theory of Errors and Least Squares Adjustment / Fan H. – Royal Institute of Technology. – Stockholm, Sweden. - 1997.
140. Höglund R. Direct Reflex EDM Technology for the Surveyor and Civil Engineer / R. Höglund, P. Large. – Trimble Integrated Surveying Group, Westminster, Colorado, USA.
141. Kaiyuen Wong, Monitoring Hong Kong's bridge / Kaiyuen Wong, King-leung Man, Wai-yee Chan // GPS World. – 2001. – V.12. - №7. – P.10-17.
142. Keeping an eye on the pipeline. Displacement monitoring with InSAR [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: http://www.halliburton.com/public/pe/contents/Case_Histories/web/A_through_R/H08449.pdf
143. Liu S. T. Deformation monitoring during construction of subway tunnels in soft ground / S.T. Liu // Proceedings of 6th International symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction, 2008, pp. 312-317.
144. Merkle W. Use of the total station for serviceability monitoring of bridges with limited access in Missouri, USA / W. Merkle, J. J. Myers // [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/762_Myers.pdf

145. Monserrat O. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching / O. Monserrat, M. Crosetto // *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. – 2008. - № 63. – P. 142-154.
146. Mosbeh R. Kaloop Using Total Station for monitoring the deformation of high strength concrete beams / Mosbeh R. Kaloop, Ashraf A.Beshr, Mohammed Y.Elshiekh // [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: www.researchgate.net/profile/Mosbeh_Kaloop/publication/200463090_Using_Total_Station_for_monitoring_the_deformation_of_high_strength_concrete_beams/links/0fcfd5137f4822697b000000.pdf
147. Pervozvanski A., Canudas de Wit C. Vibrational Smoothing in Systems with Dynamic Friction // *Subm. to Trans. ASME*. – 1998.
148. Ross P. Fiber-optic monitoring: avoiding the cost of Kalamazoo / Patrick Ross // [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: <http://www.examiner.com/article/fibre-optic-monitoring-avoiding-the-cost-of-kalamazoo>
149. Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: diss. ... Dr. of Sciences / Thorsten Schulz. – Berlin, 2007. – 172 p.
150. Shien Ri, Measuring small deformations of large structures using a digital camera / Shien Ri, Hiroshi Tsuda // [Электронный ресурс] – доступ до ресурсу: <http://spie.org/x94042.xml>
151. Tournas E. Deformation Monitoring Based on Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Registration / E. Tournas, M. Tsakiri // 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, 12-15 May. – 2008. – 9p.
152. Qiu D.W. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring of the thermal pipeline traversed subway tunnel engineering / D.W. Qiu, J.G. Wu // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Управління
проектно-кошторисних робіт
філії УМГ «ХАРКІВТРАНСГАЗ»
ПАТ «УКРТРАНСГАЗ»

Носенко М.О.

« 23 »

11

2015 р.



АКТ № 1

впровадження результатів дисертаційної роботи

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

здобувача кафедри землевпорядкування та кадастру

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Кухтара Дениса Васильовича

Комісія у складі:

голови – Грінки Ореста Петровича – начальника відділу вишукувань
Управління проектно-кошторисних робіт філії УМГ «ХАРКІВТРАНСГАЗ».

і членів комісії:

1. Жирко Дмитра Володимировича – начальника сектору геодезії відділу вишукувань;
2. Майбороди Олександра Вікторовича – провідного інженера сектору геодезії відділу вишукувань;
3. Нуриєва Олександра Юрійовича – провідного інженера сектору геодезії відділу вишукувань

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи (методика геодезичного контролю надземних переходів магістральних газопроводів)

Кухтара Дениса Васильовича використані фахівцями Управління проектно-кошторисних робіт філії УМГ «ХАРКІВТРАНСГАЗ» при проведенні топографо-геодезичних робіт з визначення просторового положення (геодезичне тривимірне позиціонування) чотирьох надземних переходів шлейфів D_y 1200 до ГКС «Павлоград» Запорізького ЛВУМГ.

У подальшому планується застосування результатів дисертаційного дослідження Кухтара Д.В. фахівцями Управління проектно-кошторисних робіт філії УМГ «ХАРКІВТРАНСГАЗ» при контролі технічного стану надземних переходів газопроводів на території Запорізького ЛВУМГ.

Комісія

 (підпис)		Гінка О.П. (ініціали, прізвище)
 (підпис)		Нурко Д.В. (ініціали, прізвище)
 (підпис)		Нурьев О.В. (ініціали, прізвище)
 (підпис)		Майборода О.В. (ініціали, прізвище)