

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ГЛОБА ЯРОСЛАВ МИКОЛАЙОВИЧ**

**УДК 550.374+550.837**

**ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОЦІНКИ  
СТАНУ ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ НАФТО-ГАЗОВОЇ  
ПРОМИСЛОВОСТІ**

04.00.22 – Геофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата геологічних наук

**КИЇВ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі геофізики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Рева Микола Васильович**  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
МОН України, доцент кафедри геофізики

**Офіційні опоненти:** доктор геологічних наук, старший науковий співробітник  
**Пігулевський Петро Гнатович**  
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,  
старший науковий співробітник відділу сейсмічної  
небезпеки

кандидат геологічних наук, доцент  
**Багрій Сергій Михайлович**  
Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу, доцент кафедри геотехногенної безпеки та  
геоінформатики

Захист відбудеться «5» травня 2021 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.42 при Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, м. Київ, вул. Васильківська, 90, ауд.104.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 58, к. 12.

Автореферат розісланий «\_\_» березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.42,  
кандидат геологічних наук



Бондар К.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню методики оцінки стану інженерних споруд нафто-газової промисловості.

**Актуальність теми дисертації.** В усіх промислово розвинених країнах все більше набуває проблема захисту металу від ґрунтової корозії. Серед різних способів, які використовуються для її вирішення, особливе місце займають системи електрохімічного (катодного) захисту, які широко застосовуються для запобігання руйнуванню металевих споруд, які експлуатуються в умовах природних вод і ґрунтів. Область застосування катодного захисту вельми широка; вона охоплює підземні водопроводи, газо-, нафто-, і продуктопроводи, і металеві трубопроводи інших призначень, прокладені в землі, підземні кабелі зв'язку, силові кабелі з металеві оболонкою і бронею, кабелі, прокладених в трубах, заповнених стисненим газом або маслом, різні резервуари-сховища і цистерни.

У зв'язку із зростанням мережі внутрішньоміського, міжрайонного та магістрального трубопровідного транспорту, розвитком різних комунікацій електропостачання, все більш широкі масштаби набуває виробництво різної захисної апаратури і вимірювальних приладів, які використовуються при обстеженні стану інженерних споруд. Для запобігання ґрунтової корозії були розроблені методи високоєфективного застосування катодного захисту підземних металевих споруд.

**Зв'язок програми з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано під час навчання в аспірантурі кафедри геофізики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Результати роботи ґрунтуються на матеріалах електрометричних досліджень 2015-2018 років, що проводилися в рамках держзамовлення на «виконання роботи по комплексному діагностичному обстеженню стану протикорозійного захисту та корозійного стану лінійної частини магістральних трубопроводів», у яких автор брав безпосередню участь.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є вдосконалення методики оцінки стану інженерних споруд за даними електрометричних досліджень та визначення місць розташування дефектів в інженерних спорудах. Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи вирішувалися наступні задачі:

1. Збір, систематизація та узагальнення наявних даних про електрохімічну корозію.
2. Збір та систематизація літературних даних з методики польових електрометричних досліджень методами вертикального електричного зондування, електричного профілювання, виносного електрода та поперечного градієнта.
3. Розробка алгоритмів інтерпретації електричних полів, спричинених витоками струму різної конфігурації – точкових, лінійних, поверхневих.
4. Оцінка необхідної детальності електрометричних досліджень на виявлених аномальних місцях пошкодження ізоляційного покриття підземних комунікацій.

5. Виконання експериментальних досліджень з обстеження підземних трубопроводів електрометричними методами – виносного електрода та поперечного градієнта.
6. Аналіз результатів електрометричного обстеження та виявлення місць пошкоджень за аномаліями потенціалу та градієнта потенціалу.
7. Проведення інтерпретації отриманих даних електрометрії з метою оцінки ступеня виявлених пошкоджень за визначеними витоками струму.
8. Аналіз інформативності виконаних принципів і методичних розробок на експериментальних матеріалах.

**Об'єктом дослідження** є навіколотрубне геологічне середовище, у якому відбуваються процеси електрохімічної корозії.

**Предметом дослідження** є характерні зміни електричного поля в просторі та часі в місцях розташування дефектів в інженерних спорудах нафто-газової промисловості.

**Методи дослідження** включають загальні підходи до збору, аналізу, систематизації та обробки даних, розв'язання прямих та обернених задач електрометрії, експериментальні дослідження методами симетричного електричного профілювання, виносного неполярного електрода порівняння, поперечного градієнта.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

➤ Уперше досліджено вплив розмірів вимірювальної лінії  $MN$  та відповідність атрибутів поперечного і поздовжнього градієнтів поля точкового витоку струму їх теоретичним значенням, встановлено, що при детальних обстеженнях крок спостережень  $\Delta x$  повинен бути у межах  $0,4-0,5h$ .

➤ Уперше досліджена точність визначення глибини точки витоку струму від відносної густоти точок виміру потенціалу поля.

➤ Розроблені дво- та триточкові системи інтерпретації аномального розподілу потенціалу за умови довільної густоти точок спостережень.

➤ Розроблений оптимізаційний алгоритм інтерпретації аномального розподілу потенціалу поля точкового витоку струму з використанням методу найменших квадратів.

➤ Досліджена збіжність полів лінійного та точкового джерел витоку струму в залежності від розмірів лінійного джерела.

➤ Розроблена методика інтерпретації аномального розподілу потенціалу поля лінійного витоку струму за двоточною схемою.

➤ Розвинена методика інтерпретації даних зйомки поперечного градієнта способами параметрів  $m$  і  $q$  для реальних установок.

➤ Досліджена збіжність полів дискового та точкового джерел витоку струму в залежності від відносних розмірів джерела струму.

➤ Розроблена система інтерпретації електричних полів джерел дискового типу, що дозволяє визначати просторове положення, силу витоку струму та розміри пошкоджень.

**Практичне значення одержаних результатів.** Вдосконалена методика оцінки стану інженерних споруд нафто-газової промисловості, яка в рамках комплексного діагностичного обстеження стану протикорозійного захисту та корозійного стану

лінійної частини магістральних трубопроводів, дозволила розв'язати ряд задач, зокрема ефективно ідентифікувати місця розташування та розміри дефектів.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є науковим дослідженням автора. Наукові положення і висновки дисертації, що виносяться на захист, отримані автором особисто та ґрунтуються на його особистих дослідженнях. У статтях підготовлених разом із співавторами дисертанту належать ідея, збір та обробка польових матеріалів, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень, формування висновків.

**Апробації результатів дисертації.** Основні положення дисертації та результати досліджень доповідалися на:

1. XIV Міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 2015);
2. XV Міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 2016);
3. VI Всеукраїнська молодіжна наукова конференція-школа "Сучасні проблеми геологічних наук" (Київ, 2016);
4. XVI Міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 2017);
5. VII Всеукраїнська молодіжна наукова конференція-школа "Сучасні проблеми геологічних наук" (Київ, 2017);
6. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: International Scientific Conference (Київ, 2017);
7. Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем: Міжнародна наукова конференція (Київ, 2017);
8. XVIII Міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 2019).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 16 наукових робіт, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку МОН за спеціальністю дисертації та одна – в закордонному науковому періодичному виданні, а також 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел із 82 найменувань та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 163 сторінки; робота містить 65 рисунків та 18 таблиць.

Дисертаційну роботу виконано під науковим керівництвом кандидата фізико-математичних наук **Рєви Миколи Васильовича**, якому автор щиро вдячний за надання кваліфікованих консультацій та допомогу у вирішенні наукових проблем. Автор також висловлює подяку за численні консультації, поради, настанови та практичну допомогу доктору геологічних наук, директору ННІ «Інститут геології», професору **Вижві С.А.**, кандидату геологічних наук, заступнику директора ННІ «Інститут геології», старшому науковому співробітнику **Безродній І.М.**, кандидату геологічних наук, завідувачу кафедри геофізики, доценту **Оніщуку В.І.**, співробітникам кафедри геофізики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність роботи, формулюється мета та основні завдання дослідження, вказується наукова новизна отриманих результатів, їх практична цінність та особистий внесок здобувача, наведено дані апробації дисертаційної роботи, подана її загальна структура та характеристика.

У **першому розділі** наведена характеристика корозійних умов експлуатації трубопроводів.

У процесі експлуатації трубопроводів корозійному руйнуванню піддається, як правило, зовнішня поверхня. Інтенсивність взаємодії трубопровідних споруд з навколишнім середовищем, протяжність прокладки в різних кліматичних і гідрогеологічних умовах, площа поверхні контакту з ґрунтом, температура продукту, що транспортується, та відповідно кількість внесеного тепла (рідше холоду) в ґрунт, перетин багатьох природних і штучних перешкод – все це зумовлює високе корозійне навантаження.

Велика частина устаткування нафто- і газотранспортної системи виготовлена з вуглецевих і низьколегованих сталей, які внаслідок їх термодинамічної нестійкості кородують в більшості природних і технологічних середовищах. Сталеві конструкції об'єктів трубопровідного транспорту нафти і газу експлуатуються на повітрі, під землею і під водою, відповідно зовнішня поверхня піддається в основному електрохімічній корозії, корозія по хімічному механізму протікає значно рідше.

Електрохімічна корозія підпорядковується законам електрохімічної кінетики і являє собою окислення металу в електропровідних середовищах, що супроводжується утворенням і протіканням електричного струму. При цьому прийнято говорити про диференціювання кородуючої поверхні на катодні й анодні зони, причому продукти корозії утворюються переважно на анодних ділянках, а швидкість корозії визначається сполученими катодним і анодним процесами.

У розділі виконаний аналіз різноманітних корозійних умов експлуатації трубопроводів. У разі наземної прокладки трубопроводів для зовнішньої поверхні резервуарів, газгольдерів й інших складових (комунікацій) газо- і нафтотранспортної інфраструктури найбільш характерна *атмосферна корозія*.

У разі переходів трубопроводів через водні перешкоди або заболочені місцевості вони піддаються *рідинній корозії*. На швидкість рідинної корозії металів впливає ряд факторів: рух рідинного середовища призводить до зростання швидкості корозії; температура розчину електроліту; наявність і концентрація солей у водних розчинах; біокорозія (обростання підводних трубопроводів болотними рослинними і тваринними організмами).

При підземній експлуатації під впливом ґрунтового електроліту і порового повітря відбувається *ґрунтова корозія*. На ґрунтову корозію підземних сталевих трубопроводів впливають такі основні фактори: наявність вологи (утворення електроліту і можливість виникнення електрохімічної корозії); проникність ґрунтів, яка залежить від пористості, хімічного складу та інших факторів; електрична провідність ґрунтів, яка залежить від вологості, складу й концентрації розчинів, структури ґрунту; кислотність ґрунту (рН=3-7), яка прискорює корозію металів в результаті додаткової катодної деполяризації іонами водню; різнорідність ґрунтів

уздовж трубопроводу, що призводить до утворення макрокорозійних пар і посилення корозії металів; температура ґрунту й транспортованого по трубопроводу продукту.

Підземну корозію часто супроводжує *мікробіологічна корозія*, викликана життєдіяльністю мікроорганізмів, велика кількість яких міститься в ґрунтах. Найбільшу небезпеку з точки зору корозії представляють сульфатвідновлювальні бактерії (СВБ), які широко поширені в природі і розвиваються в мулистих, глинистих і болотних ґрунтах, бруді, стічних водах, нафтових свердловинах, донних відкладах, цементі.

В результаті витоків струму із працюючих пристроїв (електрифікованого залізничного транспорту, промислових установок, що мають заземлення) в землі можуть існувати так звані *блукаючі струми*, сила і напрямок яких може змінюватися в часі. Протікання цих струмів по сталевих підземних комунікаціях, зокрема по підземних трубопроводах, впливає на швидкість їх корозійного руйнування.

За наявності в експлуатованих в електропровідних корозійних середовищах трубопроводах електричного контакту двох різнорідних металів, що мають різний електрохімічний потенціал, або однорідних металів з відмінною структурою може також виникати корозія (контактна корозія).

**У другому розділі** розглянута технологія проведення електрометричних методів для оцінки стану захищеності трубопровідної системи та визначення місць розташування дефектів на трубопроводах.

Захист підземних трубопроводів від корозії здійснюється двома способами: пасивний захист – покриття труб ізоляційним шаром; активний електрохімічний захист станціями катодного захисту (СКЗ), за допомогою яких створюється захисний потенціал труби, який значно уповільнює швидкість корозійних процесів.

Корозійний стан магістрального трубопроводу та його ізоляційного покриття, а також ефективність роботи засобів активного захисту визначається систематичним проведенням електрометричних обстежень, які виконуються також з метою отримання вихідних даних для реконструкції, модернізації та капітального ремонту трубопроводу. Залежно від ступеня вивченості комплексного захисту і корозійного пошкодження трубопроводу польові електрометричні обстеження поділяються на такі види: експрес-обстеження; визначення стану активного електрохімічного захисту; детальне обстеження стану корозії, ізоляції та захищеності трубопроводу.

*Експрес-обстеження* є рекогносцирувальним етапом і проводиться з метою отримання узагальнених даних за станом активного електричного захисту. Електрометричні роботи на цьому етапі обмежуються вимірами різниці потенціалів “труба-земля” на існуючих контрольно-вимірювальних пунктах (КВП) на всій довжині магістрального трубопроводу, визначенням стану і режимів роботи всіх існуючих активних засобів електрохімічного захисту (установок катодного і дренажного захисту, протекторних установок), визначенням орієнтовної витрати захисного струму на 1 м<sup>2</sup> поверхні трубопроводу (мА/м<sup>2</sup>).

*Визначення стану активного електрохімічного захисту* проводиться з метою оцінки стану існуючих активних засобів електрохімічного захисту, визначення суцільності захисту трубопроводу існуючими активними засобами електрохімічного захисту як по протяжності, так і в часі, виявлення необхідних умов для забезпечення

суцільного активного електрохімічного захисту трубопроводу від корозії (у разі потреби). Електрометричні обстеження проводять методами вимірювання різниці потенціалів “труба-земля” за наявними контрольно-вимірювальними пунктами, визначення осі трубопроводу на поверхні землі в місцях обстеження методом виносного електрода (у разі необхідності), винесення неполярного електрода порівняння.

*Детальне обстеження стану корозії, ізоляції та захищеності магістрального трубопроводу* проводиться з метою визначення стану ізоляційного покриття і корозійного пошкодження тіла трубопроводу, виявлення ділянок трубопроводу, що підлягають ремонту, для ремонту старої і дефектної ізоляції, заміни ізоляції і відновлення стінки труби або часткової і повної заміни труб.

Детальне обстеження технічного стану трубопроводу здійснюється методами визначення глибини закладення трубопроводу на аномальних ділянках і проекції осі трубопроводу на поверхню землі, виносного неполярного електрода порівняння з кроком вимірювання 10 м на всій ділянці обстежуваного трубопроводу, вимірювання градієнта потенціалу на виявлених аномальних ділянках поперечною двоелектродною установкою з кроком 1 м при включених установках катодного захисту.

За результатами обробки отриманого польового матеріалу для уточнення діагностики технічного стану трубопроводу проводиться вибіркоче контрольне шурфування. Роботи з детального обстеження технічного стану трубопроводу є заключним етапом електрометричних обстежень.

У **третьому розділі** розглянуті розв’язки задач про електричні поля джерел точкового, лінійного та поверхневого характеру в рамках спрощеної моделі, яка передбачає розташування труб в однорідному півпросторі з питомим опором  $\rho$ . Звичайно, що такі моделі задач хоча і спрощені, водночас дозволяють у першому наближенні виконати оцінки місця розташування пошкоджень і кількісну характеристику витоку струму з них, що є важливим параметром, по якому можлива оцінка ступеня пошкоджень. Моделі вибрані, виходячи із можливої геометричної конфігурації пошкоджень.

*Точкове пошкодження, з якого стікає струм сили  $I$ .* Результат розв’язання задачі для потенціалу електричного поля в декартових координатах  $U(x, y, h)$  з початком в епіцентрі джерела має вигляд:

$$U(x, y, h) = Q \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}, \text{ на трасі трубопроводу (} y=0 \text{)} \quad U(x) = Q \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + h^2}},$$

де  $Q = I\rho/(2\pi)$ ,  $h$  – глибина до точкового пошкодження.

З теоретичних засад поперечний градієнт виражається  $\Delta U_y = MN \cdot \partial U / \partial y$ :

$$\Delta U_y(x, y, h) = -Q \cdot MN \cdot \frac{y}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}.$$

У дійсності практично вимірювана поперечна різниця потенціалів має вигляд:

$$\Delta \tilde{U}_y(x, y, h) = U_M - U_N = Q \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + (MN/2)^2 + h^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + h^2}} \right].$$

Поздовжній теоретичний і практичний градієнт виражаються:



$$\Delta U_x = MN \cdot \partial U / \partial x = -Q \cdot MN \frac{x}{[x^2 + h^2]^{3/2}}$$

$$\Delta \tilde{U}_x = U_M - U_N = Q \left[ \frac{1}{\sqrt{(x - MN/2)^2 + h^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x + MN/2)^2 + h^2}} \right]$$

На рис. 1,а для прикладу наведені графіки розподілу потенціалу  $U(x)$  його теоретичних поперечного і поздовжнього градієнтів, а на рис. 1,б – практично вимірних потенціалу й градієнтів ( $MN$  – розмір вимірювальної лінії,  $\Delta x$  – крок вимірювання).

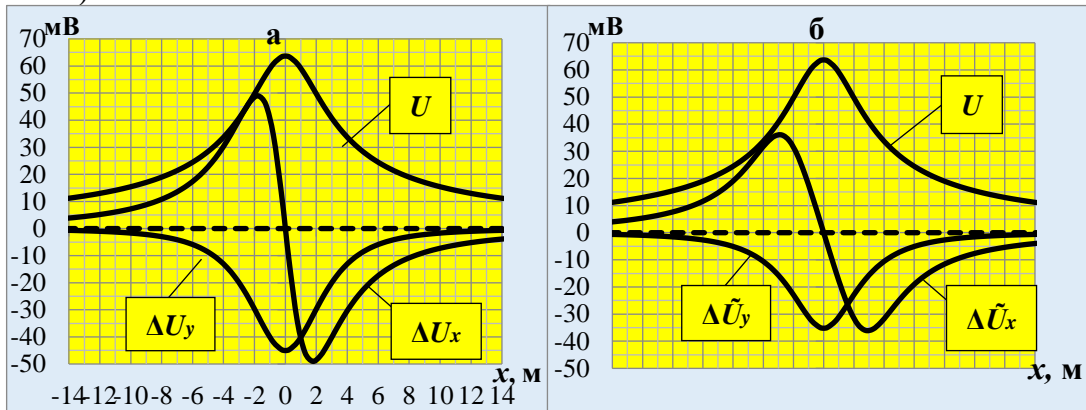


Рис. 1. Графіки потенціалу ( $U$ ), теоретичних (а) та практичних (б) поздовжнього і поперечного градієнтів над точковим пошкодженням:

$I=10$  мА;  $h=2,5$  м;  $\rho=100$  Ом·м;  $MN=5$  м;  $\Delta x=5$  м.

Із порівняння графіків видно, що при практичному вимірюванні амплітуди поперечного і поздовжнього градієнтів менші теоретичних, а екстремуми графіка поздовжнього градієнта знаходяться на більших відстанях від епіцентра джерела, ніж для теоретичного поздовжнього градієнта. Все це свідчить про те, що в разі застосування для інтерпретації експериментальних графіків поперечного і поздовжнього градієнтів алгоритмів, властивих теоретичним розв'язкам, будуть отримані хибні результати. Цей висновок не стосується графіка розподілу потенціалу  $U$ , отриманого способом виносного електрода «труба-земля», оскільки реальним датчиком потенціалу є виносний електрод, що практично не має розмірів. Отже у цьому випадку практичні і теоретичні значення потенціалів однакові.

У результаті виконаних досліджень по з'ясуванню розбіжності практично вимірюваних градієнтів з теоретичними в межах  $\delta < 5\%$  залежно від розмірів вимірювальної лінії встановлено, що така умова для поперечного градієнта виконується в разі  $MN \leq 0,4h$ , а для поздовжнього при  $MN \leq 0,51h$ . Бажано при деталізаційних дослідженнях ці умови витримувати.

В розділі розроблені декілька методичних і алгоритмічних схем *інтерпретації реальних графіків розподілу потенціалу точкового витоку струму*:

- 1) Двоточкова схема інтерпретації;
- 2) Триточкова схема інтерпретації за відомого фону поля і довільного положення початку системи координат;
- 3) Триточкова схема інтерпретації в координатах з початком у точці екстремуму в разі невідомого постійного фону;

4) Оптимізаційний алгоритм інтерпретації аномального розподілу потенціалу в системі координат з початком у точці екстремуму;

5) Оптимізаційна схема інтерпретації аномального розподілу потенціалу, вільного від фону (довільна система координат).

Також були отримані алгоритми інтерпретації аномалій поперечного градієнта.

*Лінійне пошкодження.* Розподіл потенціалу поля, зумовленого витокм струму із лінійного пошкодження розміром  $2l$ , отримують інтегруванням полів точкових витоків струму вздовж лінійного пошкодження:

$$U(x, y) = \frac{I\rho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{(x+l)^2 + y^2 + h^2} + x+l}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} + x-l}$$

Поздовжній  $\Delta U_x$  і поперечний  $\Delta U_y$  градієнти визначаються у вигляді:

$$\Delta U_x(x, y) = \frac{\partial U}{\partial x} \cdot MN = \frac{I\rho}{4\pi l} MN \left[ \frac{1}{\sqrt{(x+l)^2 + y^2 + h^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2}} \right];$$

$$\Delta U_y(x, y) = \frac{\partial U}{\partial y} \cdot MN = \frac{I\rho}{4\pi l} MN \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} \left[ \sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} + x-l \right]} - \frac{1}{\sqrt{(x+l)^2 + y^2 + h^2} \left[ \sqrt{(x+l)^2 + y^2 + h^2} + x+l \right]} \right\}.$$

Графіки потенціалу, поздовжнього й поперечного градієнтів поля лінійного витоку струму схожі з такими ж графіками для поля точкового джерела, лише при збільшенні його розмірів – збільшуються також горизонтальні розміри аномальних графіків. Зокрема, для поздовжнього градієнта у разі  $2l/h \geq 4$  відстань між екстремумами відповідає розмірам лінійного витоку струму з точністю  $\delta_l \leq 2,8\%$ .

Виконані дослідження збіжності полів лінійного й точкового витоків струму свідчать, що розбіжність  $\delta \leq 4\%$  для потенціалів настає за умови  $2l/h < 0,9$ , а для поздовжніх градієнтів – за умови  $2l/h \leq 0,4$ . Для поперечного градієнта вона залежить не тільки від  $2l/h$ , а й від  $y/h$  – чим більша горизонтальна відстань точки вимірювання від осі лінійного витоку струму – тим більш широкі межі збіжності полів. В роботі розраховані відповідні залежності між  $2l/h$  й  $y/h$  для розбіжності  $\delta \leq 4\%$  і встановлені практично аналітичні кореляційні рівняння регресії.

Інтерпретація аномальних графіків потенціалу з визначення  $h$  може бути виконана графічним способом за допомогою розрахованої номограми (рис. 2). Сумарний виток струму розраховується згідно з формулою:

$$I = \frac{2\pi \cdot 2l}{\rho} \cdot \frac{U_{\max}}{\ln \left[ \frac{(\sqrt{l^2 + h^2} + l)}{(\sqrt{l^2 + h^2} - l)} \right]}$$

В роботі розроблений оригінальний алгоритм інтерпретації аномалії розподілу потенціалу за значеннями ширини аномалії на двох відносних амплітудних рівнях –  $k_1=0,5$  і  $k_2=0,75$ . За розрахованою

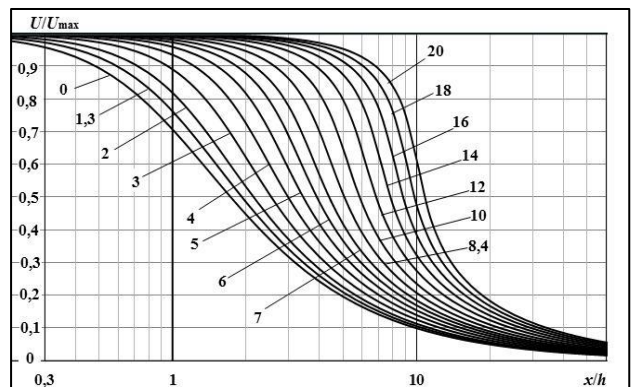


Рис. 2. Палетка для визначення глибини лінійного витоку струму: шифр кривих –  $2l/h$ .

номографом  $q_{0,5}/q_{0,75}=f(l/h)$  і отриманим відповідним кореляційним зв'язком, визначається  $l/h$ . За встановленими кореляційними зв'язками  $q_{0,5}/h=f_1(l/h)$  чи  $q_{0,75}/h=f_2(l/h)$  визначається  $h$ , а за наведеною вище формулою – сила струму витoku із лінійного пошкодження.

*Поверхнєве пошкодження прямокутної форми.* Розподіл потенціалу електричного поля отриманий шляхом поверхневого інтегрування поля точкового джерела по поверхні плоского пошкодження розміром  $2l_x \times 2l_y$ :

$$U(x, y) = \frac{I\rho}{2\pi \cdot 2l_x \cdot 2l_y} \left\{ (x+l_x) \ln \frac{y+l_y + \sqrt{(x+l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}}{y-l_y + \sqrt{(x+l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}} - \right. \\ \left. - (x-l_x) \ln \frac{y+l_y + \sqrt{(x-l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}}{y-l_y + \sqrt{(x-l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}} + (y+l_y) \ln \frac{x+l_x + \sqrt{(x+l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}}{x-l_x + \sqrt{(x-l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}} - \right. \\ \left. - (y-l_y) \ln \frac{x+l_x + \sqrt{(x+l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}}{x-l_x + \sqrt{(x-l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}} - \right. \\ \left. - h \left[ \operatorname{arctg} \frac{(x+l_x)(y+l_y)}{h\sqrt{(x+l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(x-l_x)(y+l_y)}{h\sqrt{(x-l_x)^2 + (y+l_y)^2 + h^2}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \operatorname{arctg} \frac{(x+l_x)(y-l_y)}{h\sqrt{(x+l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(x-l_x)(y-l_y)}{h\sqrt{(x-l_x)^2 + (y-l_y)^2 + h^2}} \right] \right\}.$$

Вирази для градієнтів наведені в роботі.

У розділі виконане дослідження максимальної розбіжності потенціалу, поздовжнього й поперечних градієнтів електричного поля поверхневого пошкодження з полями точкового, лінійного й дискового витоків струмів тотожної інтенсивності, центри яких суміщені із центром поверхневого джерела. Розрахунки (табл. 1) виконані для глибини залягання підземного трубопроводу  $h=2$  м. Радіус дискового джерела вибирався, виходячи з рівності площ дискового й поверхневого джерел.

Із розрахунків випливає, що найбільш стійке наближення до поля поверхневого пошкодження відмічається для поля лінійного витoku струму. За несуттєвої асиметрії поверхневого пошкодження ( $l_x/l_y < 2$ ) несуттєва розбіжність спостерігається і в поля дискового витoku струму. Ці наближені моделі можуть бути використані для визначення сили струму витoku.

Таблиця 1

Розміри пошкодження, м	Потенціал $U$			Поздовжній градієнт $\Delta U_x$			Поперечний градієнт $\Delta U_y$		
	$\delta_{\text{п-точ}}$ , %	$\delta_{\text{п-лін}}$ , %	$\delta_{\text{п-диск}}$ , %	$\delta_{\text{п-точ}}$ , %	$\delta_{\text{п-лін}}$ , %	$\delta_{\text{п-диск}}$ , %	$\delta_{\text{п-точ}}$ , %	$\delta_{\text{п-лін}}$ , %	$\delta_{\text{п-диск}}$ , %
0,3×0,3	0,19	0,1	0,05	1	0,25	0,25	0,65	0,43	0,19
0,6×0,3	0,46	0,1	0,1	3,1	0,23	0,6	1,32	0,46	0,7
1,2×0,3	1,5	0,01	0,51	11	0,1	6,1	3,8	0,43	3,0
0,8×0,8	1,3	0,64	0,35	6,7	1,8	1,85	4,6	3,15	1,3
1,6×0,8	3,1	0,62	0,7	19,5	1,75	3,8	8,75	3,1	4,8
3,2×0,8	8,7	0,53	3,0	>40	1,3	30	21	2,9	20

*Дискове пошкодження.* Розв'язана задача про електричне поле, створюване витоком струму дискового типу радіусу  $r_0$ , розташованого на глибині  $h$ . В циліндричній системі координат (рис. 3) з початком в епіцентрі джерела потенціальна функція та поздовжній і поперечний градієнти мають вигляд:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r_0} \arcsin \frac{2r_0}{R_1 + R_2};$$

$$\Delta U_x = \frac{\partial U}{\partial x} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{x}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}};$$

$$\Delta U_y = \frac{\partial U}{\partial y} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{y}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}},$$

де  $R_1 = \sqrt{(r-r_0)^2 + h^2}$ ,  $R_2 = \sqrt{(r+r_0)^2 + h^2}$ ,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Аналогічна задача розв'язана в інтегральній формі в припущенні рівномірного розподілу електричних зарядів на дисковій поверхні:

$$U(x, y, h) = \frac{I\rho}{2\pi^2 r_0^2} \left\{ -2\pi R + \int_0^{2\pi} \left[ \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0(x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0)} + \right. \right. \\ \left. \left. + (x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0) \ln \frac{\sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0(x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0)} + r_0 - (x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0)}{R - (x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0)} \right] d\varphi_0 \right\}.$$

Вирази для градієнтів наведені в роботі.

В розділі виконаний аналіз інтерпретаційних можливостей електричних полів джерел дискового типу. Відмічено, що поля дискових джерел досить близькі за своєю структурою до полів точкових джерел у зв'язку з однаковою осью симетрії. Показано, на відстані від епіцентра витоку струму дискового типу  $r/h=1,5$  розбіжність потенціалів становить  $\delta_U < 0,5\%$ , поздовжніх градієнтів  $\delta_{E_x} < 3\%$ , поперечних градієнтів  $\delta_{E_y} < 0,7$  (при  $y/h=1$ ) і  $\delta_{E_y} < 1,8\%$  (при  $y/h=0,5$ ). У цьому сенсі визначення глибини  $h$  і сили витоку струму  $I$  особливих утруднень не викликає, у зв'язку із можливістю використати для інтерпретації алгоритмічні схеми, властиві для поля точкового витоку струму. Важливим залишається визначення розмірів дискового джерела  $r_0$ . Це можна здійснити лише за умови детальних спостережень поля в околі екстремальних точок, де фіксується певна залежність поля від розмірів джерела (рис. 4).

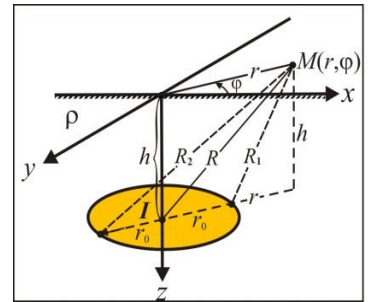


Рис. 3

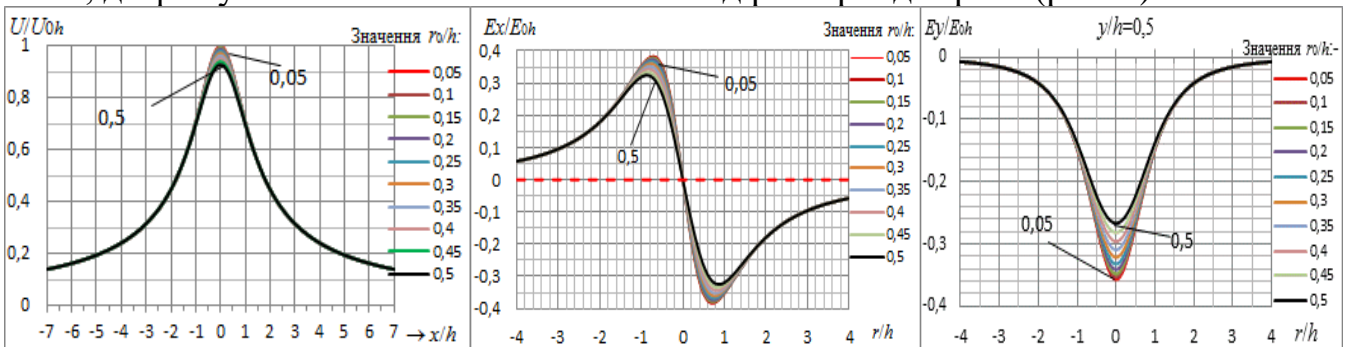


Рис. 4. Графіки розподілу потенціалу, поздовжнього та поперечного градієнтів електричного поля дискового витоку струму для різних відносних розмірів диска  $r_0/h$ .

**Четвертий розділ** присвячений результатам практичного обстеження стану електрохімзахисту ділянки нафтопроводу «Кременчук-Херсон» в межах інтервалу 105,5-106,5 км. Труба, по якій транспортується нафта має діаметр 0,72 м.

Під час аналізу експериментальних даних застосовувалися виконані у роботі принципові розробки з метою оцінки інтенсивностей струмів витоку із аномальних місць пошкоджень ізоляційного покриття трубопроводу.

Досліджувана ділянка трубопроводу знаходиться в межах захисної дії двох станцій катодного захисту – СКЗ №13 з пунктом розташування 101,910 км по трасі трубопроводу і СКЗ №14 з пунктом розташування 109,457 км по трасі трубопроводу. Обстеження стану електрохімзахисту здійснювалося вимірюваннями електричного потенціалу «труба-земля» ( $U_{mз}$ ) способом виносного електрода та вимірюваннями «поперечного градієнта» потенціалу ( $\Delta U_y$ ) – різниці потенціалів між точками на трасі трубопроводу й точками, розташованими на відстані 5 м від траси в ортогональному до неї напрямку. Крок вимірювань вздовж траси нафтопроводу складав 10 м. В аномальних місцях виконувалася деталізація з кроком 1 м. З метою оцінки поляризаційного потенціалу ( $U_p$ ) захисного покриття труби вимірювання потенціалу «труба-земля» і поперечного градієнта здійснювалося в переривчастому режимі роботи станцій катодного захисту при ввімкненому і вимкненому захисному струмі. Вимірювані глибини до осі трубопроводу впродовж інтервалу досліджень загалом варіюють у межах від 0,97-1 м, з підвищенням до 1,55 м в центральній частині досліджуваної траси в інтервалі відміток 105,95-105,99 км і до 1,85 м на правому закінченні досліджуваного інтервалу. Зміни глибин пов'язані зі змінами рельєфу земної поверхні, який є відносно витриманий (перепади висотних відміток у межах 1-2 м).

Визначення питомого опору ґрунтів, як вміщувального трубопроводу середовища, виконувалося двома симетричними чотирьохелектродними установками Веннера  $AMNB$  з різними розносами живильних ліній  $AB=6$  м і  $A'B'=9$  м (відповідно  $a=MN=2$  м й  $a=M'N'=3$  м) у пунктах траси, розташованих через 100 м. Позірний опір, вимірюваний установкою з розносом  $AB=6$  м ( $a=MN=2$  м), варіює в межах значень 29-34 Ом·м (середнє значення складає 32 Ом·м), а на розносі 9 м уявний опір змінюється в межах 26-32 Ом·м при середньому значенні 30 Ом·м. Відтак, згідно з існуючою класифікацією ґрунти, у яких знаходиться безпосередньо трубопровід, відносяться до ґрунтів із середньою корозійною агресивністю ( $\rho=20-50$  Ом·м).

На рис. 5 представлені графіки зміни потенціалу «труба-земля» при включеному ( $U_{mз,вкл}$ ) і виключеному ( $U_{mз,викл}$ ) струмах СКЗ.

Потенціали  $U_{mз,вкл}$  й  $U_{mз,викл}$  вздовж інтервалу досліджень змінюються відповідно в межах від -1,7 В до -0,9 В (в центральній зоні) з лінійним трендом  $\Delta U_{вкл}(x)=0,308x_{км}-32,494$ , В, і від -1,35 В до -0,7 В (в центральній аномальній зоні) з лінійним трендом  $\Delta U_{викл}(x)=0,2699x_{км}-28,472$ , В. Обидва лінійні тренди підвищують потенціали упродовж усієї протяжності обстежуваного інтервалу трубопроводу (1 км) на 0,27-0,3 В.

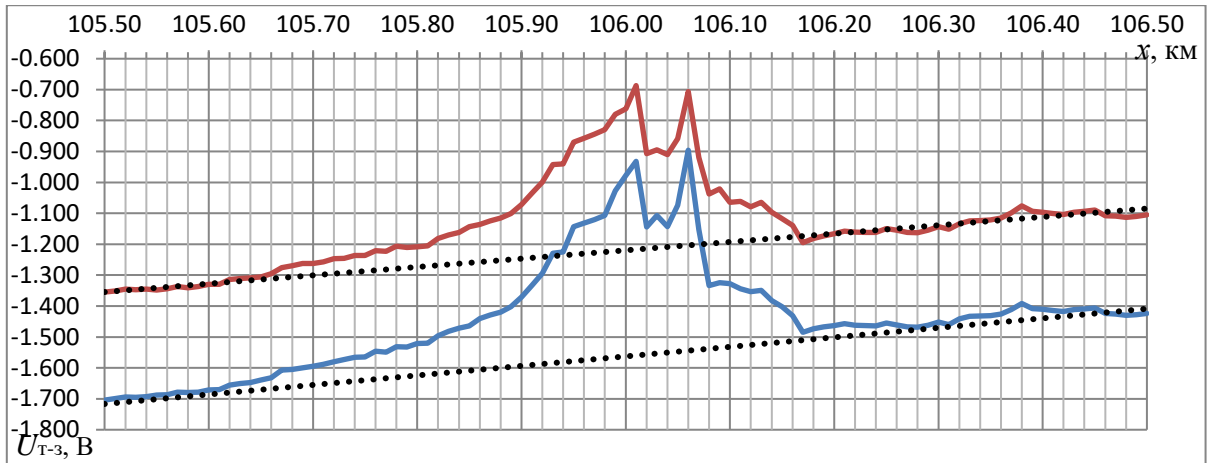


Рис. 5. Графіки розподілу потенціалу «труба-земля»  $U_{mз}$  вздовж досліджуваного інтервалу трубопроводу 105,5-106,5 км:

— при включеному струмі СКЗ; — при виключеному струмі СКЗ;  
 .... – лінійні тренди потенціалів.

Уздовж лінії тренду потенціали  $U_{mз}$  при включеному й виключеному струмах фіксують досить широку аномальну зону підвищених значень (в максимумі  $-0,9$  В і  $-0,7$  В). Скоріше за все ця аномалія (для досліджуваного інтервалу її можна умовно назвати «регіональною») спричинена наявністю в середній частині траси відносно широкої (200-250 м) зони знижених питомих опорів вміщувальних трубопроводів ґрунтових відкладів. В максимумі чітко проявляються дві вузько локалізовані аномалії, вочевидь пов'язані з пошкодженнями ізоляційного покриття.

Омічна складова  $\Delta U_{ом} = U_{mз,вкл.} - U_{mз,викл.}$  повторює усі риси поведінки потенціалу при включеному і виключеному струмі, має незначний лінійний тренд, також наявна «регіональна» аномалія омічного потенціалу, що підтверджує літологічну природу «регіональної» аномалії. Максимальне значення омічної складової (з урахуванням незначного лінійного тренду) становить 130-140 мВ.

Із розглянутої загальної характеристики спостережень потенціалів «труба-земля» можна дійти таких висновків. Абсолютна корельованість графіків потенціалів при включенні і виключенні струму СКЗ, а також практично ідентичні їх лінійні тренди свідчать про те, що електрична схема електрохімзахисту залишається замкненою і при вимиканні струму, що призводить до існування омічної складової, яка в даному разі зумовлюється струмом, генерованим поляризаційним потенціалом. Різниця між омічними складовими при включеному і виключеному струмі полягає в інтенсивностях струмів, що протікають в земному провіднику: у першому випадку струми зумовлені поляризаційним потенціалом і прохідним струмом СКЗ, у другому – лише поляризаційним потенціалом. Відтак відмінність вимірюваних потенціалів  $U_{mз,вкл.}$  й  $U_{mз,викл.}$  відзначається в різних амплітудних значеннях їх омічних складових, оскільки інтенсивність струмів у вміщувальному середовищі різна. Структура вміщувального середовища однакова для режимів включення й виключення, тому спостерігається повна корельованість графіків (разом з омічною складовою) і практично однаковий їх тренд.

Сформульоване уявлення про структуру електричного поля електрохімзахисту підтверджується також і спостереженнями поперечного градієнта. Звернемо увагу на



рис. 6, на якому зображені графіки виміряного поперечного градієнта вздовж досліджуваного інтервалу трубопроводу.

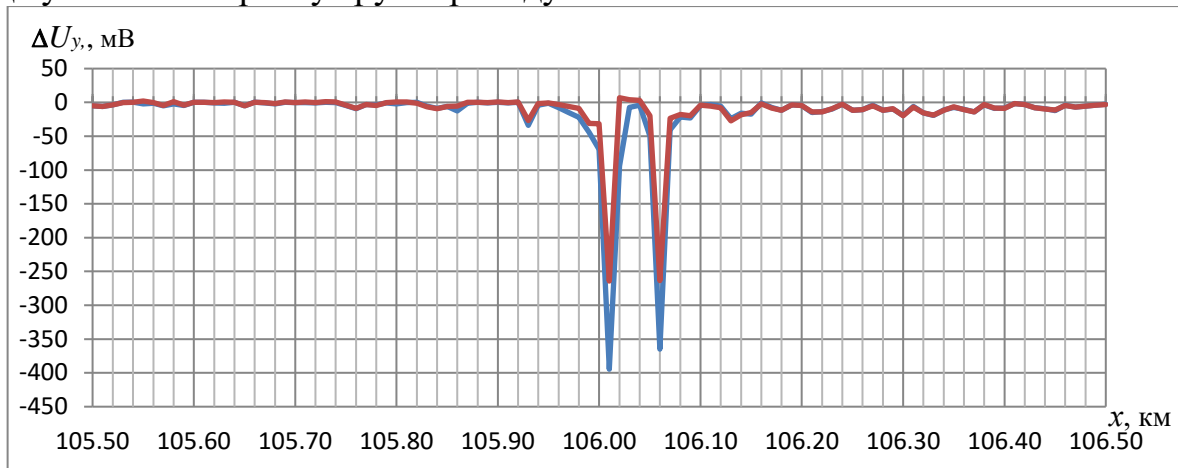


Рис. 6. Аномалії поперечного градієнта: №1 – ПК 106,06 км; №2 – ПК 106,01 км.

Поперечним градієнтом чітко фіксуються дві відносно вузько локалізовані аномальні зони. Перша із них (106,06 км) має амплітуди в максимумі для режиму включення струму  $\Delta U_{y,вкл.} = -365$  мВ і для режиму виключення струму  $\Delta U_{y,викл.} = -264$  мВ, друга аномальна зона (106,01 км) – відповідно  $\Delta U_{y,вкл.} = -395$  мВ і  $\Delta U_{y,викл.} = -264$  мВ. За межами цих аномальних зон, які, поза всяким сумнівом, спричинені витоками електричного струму із місць пошкоджень ізоляційного покриття труби, поперечний градієнт практично має значення близькі до нульових, у той час, як на цих інтервалах потенціали «труба-земля» характеризуються аномальною поведінкою і наявністю трендів. Це підтверджує обґрунтованість вище розглянутої концепції структури електричного поля електрохімзахисту.

У межах аномальних зон були проведені деталізаційні вимірювання з кроком 1 м, у результаті отримані відповідні графіки (рис.7).

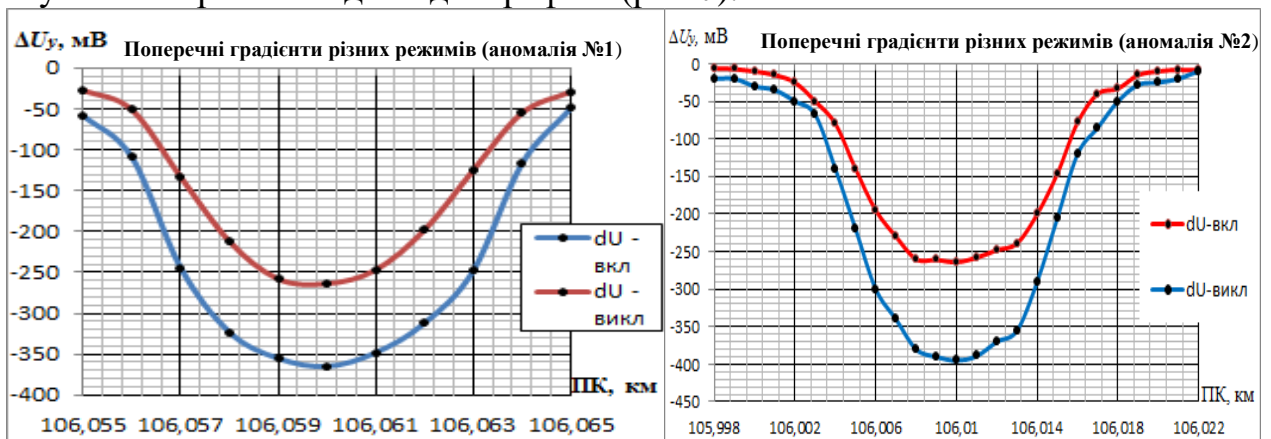


Рис. 7. Аномалії поперечних градієнтів при включенні і виключенні струму СКЗ

В роботі виконана кількісна інтерпретація аномалій поперечного градієнта в рамках моделі лінійного джерела витоку струму. Визначення глибини  $h$  і розмірів аномальної зони  $2l$  виконувалося методом підбору на основі функціональних характеристик аномалій. Сила струму  $I$  визначалася по амплітудному екстремальному значенні аномалії, визначалася також лінійна  $\lambda$  й поверхнева  $\sigma$

густини струму та омичний опір  $R$  просторового провідника. Результати наведені в таблицях 2 і 3.

Таблиця 2. Результати інтерпретації аномалії №1

Дані інтерпретації→	$h$ , м	$2l$ , м	$I$ , А	$\lambda$ , А/м	$\sigma$ , А/м <sup>2</sup>	$R$ , Ом
Режим струму ↓						
Включення	0,70	6,2	0,277	0,045	0,122	1,211
Виключення	0,8	5,2	0,193	0,037	0,086	1,211

Таблиця 3. Результати інтерпретації аномалії №2

Дані інтерпретації→	$h$ , м	$2l$ , м	$I$ , А	$\lambda$ , А/м	$\sigma$ , А/м <sup>2</sup>	$R$ , Ом
Режим струму ↓						
Включення	1,1	10	0,0641	0,00641	0,0283	7,5
Виключений	1	10	0,047	0,005	0,0021	7,5

Результати інтерпретації свідчать, що застосування розроблених геофізичних методичних схем деталізації аномалій та їх кількісна інтерпретація дають досить цінну інформацію про стан захищеності підземних комунікацій, яка повинна враховуватися під час прийняття інженерних рішень.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Визначені умови застосування алгоритмів інтерпретації, які ґрунтуються на теоретичній моделі поля точкового пошкодження, для визначення глибин і сили струму витоків як для лінійного типу так і для поверхневого типу пошкоджень.
2. Досліджено вплив розмірів вимірювальної лінії  $MN$  та відповідність атрибутів поперечного і поздовжнього градієнтів поля точкового витoku струму їх теоретичним значенням, встановлено, що при детальних обстеженнях крок спостережень  $\Delta x$  повинен бути у межах  $0,4-0,5h$ .
3. Досліджена точність визначення глибини точки витoku струму від відносної густоти точок виміру потенціалу поля.
4. Розроблені дво- та триточкові системи інтерпретації аномального розподілу потенціалу за умови довільної густоти точок спостережень.
5. Розроблений оптимізаційний алгоритм інтерпретації аномального розподілу потенціалу поля точкового витoku струму з використанням методу найменших квадратів.
6. Досліджена збіжність полів лінійного та точкового джерел витoku струму в залежності від розмірів лінійного джерела.
7. Розроблена методика інтерпретації аномального розподілу потенціалу поля лінійного витoku струму за двоточною схемою.
8. Розвинена методика інтерпретації даних зйомки поперечного градієнта способами параметрів  $m$  і  $q$  для реальних установок.
9. Досліджена збіжність полів дискового та точкового джерел витoku струму в залежності від відносних розмірів джерела струму.



10. Розроблена система інтерпретації електричних полів джерел дискового типу, що дозволяє визначати просторове положення, силу витоку струму та розміри пошкоджень.

11. Виконана інтерпретація двох аномалій поперечного градієнта, результати якої свідчать, що застосування розроблених геофізичних методичних схем деталізації аномалій та їх кількісна інтерпретація дають досить цінну інформацію про стан захищеності підземних комунікацій, яка повинна враховуватися під час прийняття інженерних рішень.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Глоба Р.Н. Оценка влияния коррозионных процессов на трубопроводно-транспортные природно-техногенные системы по данным электрометрии / Р.Н. Глоба, Е.М. Иваник, **Я.Н. Глоба**, С.А. Выжва // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Збірник наукових праць. – 2015. – Випуск №12. – с. 122-130. – ISSN 2409-9430. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведення досліджень, визначено ефективність методів електрометрії).*
2. Глоба Р.М. Застосування геофізичних і дистанційних методів досліджень трас трубопровідних транспортних систем / Р.М. Глоба, **Я.М. Глоба**, І.М. Зінченко, О.В. Данилов // Журнал геоінформатика. – 2017. – №2 (випуск 62). – с. 64-70. – ISSN 1684-2189. *(Особистий внесок: автором визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*
3. Danylov O.V. Geophysical and engineering methods in the study of the Ukrainian pipeline systems / O.V. Danylov, R.M. Hloba, S.V. Korneenko, **Y.M. Hloba** // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2017. – №1. – pp. 5-11. – ISSN 2071-2227. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведення досліджень, визначено ефективність методів електрометрії).*
4. Глоба Р.М. Геофізичні методи досліджень трас трубопровідних транспортних систем / Р.М. Глоба, **Я.М. Глоба**, І.М. Зінченко, О.В. Дзюба // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка – ГЕОЛОГІЯ. – 2017. – №1 (випуск 76). – с. 42-46. – ISSN 1728–2713. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведено дослідження, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*
5. **Глоба Я.М.** Інтерпретаційні можливості електричних полів джерел дискового типу / **Я.М. Глоба**, Р.М. Глоба, М.В. Рева, С.А. Вижва // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка – ГЕОЛОГІЯ. – 2020. – №4 (випуск 91). – с. 28-34. – ISSN 1728–2713 *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведено дослідження, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*

### *Статті у наукових періодичних виданнях інших держав*

6. Данилов А.В. Применение электрометрических методов и резонансно-акустического профилирования для изучения влияния геологической среды на трубопроводные транспортные системы / А.В. Данилов, Р.Н. Глоба, О.В. Дзюба,

**Я.Н. Глоба** // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. – 2016. – №2. – с. 22-28. – ISSN 1561–4212. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, аналіз попередніх досліджень, проведення досліджень).*

*Публікації за матеріалами конференції*

**7.** Глоба Р.Н. Оценка влияния коррозионных процессов на трубопроводно-транспортные природно-техногенные системы по данным электрометрии / Р.Н. Глоба, С.А. Выжва, Е.М. Иваник, **Я.Н. Глоба** // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: тези доповідей XIV Міжнародної конференції, (м. Київ, 11-14 травня 2015 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2015. – 8513\_RUS Earthdoc ID. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведення досліджень, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*

**8.** Глоба Р.М. Застосування електрометричних методів і резонансно-акустичного профілювання для вивчення впливу геологічного середовища на трубопровідні транспортні системи / Р.М. Глоба, О.В. Данилов, С.В. Корнеєнко, **Я.М. Глоба** // Сучасні проблеми геологічних наук: тези доповідей VI Всеукраїнської молодіжної наукової конференції-школи, (м. Київ, 14-16 квітня 2016 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2016. – с. 102-105. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведення досліджень, визначено ефективність методів електрометрії).*

**9.** Глоба Р.Н. Применение геофизических методов при инженерных изысканиях на трубопроводных транспортных системах / Р.Н. Глоба, О.В. Данилов, С.В. Корнеєнко, **Я.Н. Глоба** // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: тези доповідей XV Міжнародної конференції, (м. Київ, 10-13 травня 2016 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2016. – 9683\_RUS Earthdoc ID. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, проведення досліджень, визначено ефективність методів електрометрії).*

**10.** Глоба **Я.М.** Застосування електрометричних методів для вивчення впливу геологічного середовища на трубопровідні транспортні системи (на прикладі ділянок магістрального нафтопроводу "Кременчук-Херсон") / **Я.М. Глоба**, Р.М. Глоба // Сучасні проблеми наук про Землю: тези доповідей VII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції-школи, (м. Київ, 19-21 квітня 2017 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. – с. 30-32. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*

**11.** Глоба **Я.М.** Вплив геологічного середовища на трубопровідні транспортні системи у зоні блукаючих струмів / **Я.М. Глоба**, Р.М. Глоба, О.В. Данилов // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: тези доповідей XVI Міжнародної конференції, (м. Київ, 15-17 травня 2017 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. – 11726\_RUS Earthdoc ID. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*

**12.** Рева М.В. Інтегральний принцип електромагнітних зондувань як один з можливих напрямків прикладної електрометрії / М.В. Рева, **Я.М. Глоба**, І.І. Онищук

// Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем: тези доповідей III Міжнародної наукової конференції, (м. Київ, 3-5 жовтня 2017 р.). – Київ: Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України, 2017. – с. 52. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, визначено ефективність методів електрометрії, сформовано висновки).*

**13.** Рева М.В. Дипольне кругове профілювання як можливий спосіб моніторингу анізотропії середовища / М.В. Рева, І.І. Онищук, В.І. Онищук, **Я.М. Глоба** // Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: XI International Scientific Conference, (м. Київ, 11-14 жовтня 2017 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, визначено ефективність методів електрометрії).*

**14.** Глоба Я.М. Оцінка впливу корозійних процесів на трубопровідні транспортні системи за даними електрометрії / **Я.М. Глоба**, Р.М. Глоба // Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: International Scientific Conference, (м. Київ, 11-14 жовтня 2017 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. *(Особистий внесок: проведення досліджень, сформовано висновки).*

**15.** **Globa Y.M.** To the question of the detailing of electrical field anomalies caused by current leakage from pipeline damage / **Y.M. Globa**, M.V. Reva, V.I. Onyshchuk // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: тези доповідей XVIII Міжнародної конференції, (м. Київ, 13-16 травня 2019 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2019. – 16397 Earthdoc ID. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, визначено ефективність методів електрометрії).*

**16.** **Globa Y.M.** About conditions of applicability of point current leakage model for the interpretation fields which were caused by linear damage of pipelines / **Y.M. Globa**, M.V. Reva, V.I. Onyshchuk, I.I. Onyshchuk // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: тези доповідей XVIII Міжнародної конференції, (м. Київ, 13-16 травня 2019 р.). – Київ: ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка, 2019. – 16405 Earthdoc ID. *(Особистий внесок: автором сформовано завдання, сформовано висновки).*

## АНОТАЦІЯ

**Глоба Я.М. «Застосування електрометричних технологій для оцінки стану підземних комунікацій нафто-газової промисловості». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук за спеціальністю 04.00.22 – «Геофізика». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, МОН України, Київ, 2020.

Магістральні трубопроводи – це капітальні інженерно-технічні споруди, призначені для безперервного регульованого транспорту газу, нафти, нафтопродуктів та інших товарів на значні відстані.

Роль трубопровідного транспорту в економіці країни неухильно зростає. Ця обставина зумовлює вимогу надійності роботи трубопровідних систем.

У результаті старіння шару захисної ізоляції підземних трубопроводів, яке відбувається під дією зовнішніх факторів, в ізоляційному захисному шарі можуть утворюватися місця, де ізоляція порушується настільки, що відбувається витік електричного струму під дією захисного потенціалу труби. Ці процеси призводять до зменшення захисного потенціалу підземних трубопроводів, а відтак до погіршення захищеності підземних комунікацій. Виявлення місць і визначення ступеня пошкодження захисного покриття трубопроводів є питанням достатньо важливим. Такі місця фіксуються зйомкою розподілу електричного потенціалу «труба-земля» ( $U_{mз}$ ) вздовж траси трубопроводу та «поперечного градієнта» електричного поля. Оскільки місця витоків електричного струму є джерелами електричних полів, то важливо знати особливості цих полів з метою оцінки ступеня і розмірів пошкоджень.

В роботі виконаний принциповий аналіз полів витоків струму різних типів – точкового, лінійного, поверхневого й дискового. Отримано ряд принципових авторських розробок, спрямованих на поліпшення як методики електрометричних експериментальних досліджень в аномальних місцях можливих пошкоджень ізоляційного покриття трубопроводів, так і інтерпретації експериментальних даних з метою визначення глибин і сили струму витоків. Опрацьовані дані електрометричних досліджень на магістральному нафтопроводі «Кременчук-Херсон», підтверджують ефективність виконаних в дисертації розробок.

**Ключові слова:** трубопровід, корозійне пошкодження, потенціал «труба-земля», поздовжній градієнт, поперечний градієнт, витік струму.

## АННОТАЦІЯ

**Глоба Я.Н. «Применение электрометрических технологий для оценки состояния подземных коммуникаций нефте-газовой промышленности». – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологических наук по специальности 04.00.22 – «Геофизика». – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, МОН Украины, Киев, 2020.

Магистральные трубопроводы – это капитальные инженерно-технические сооружения, предназначенные для непрерывного регулируемого транспорта газа, нефти, нефтепродуктов и других товаров на значительные расстояния.

Роль трубопроводного транспорта в экономике страны неуклонно растет. Это обстоятельство обуславливает требование надежности работы трубопроводных систем.

В результате старения слоя защитной изоляции подземных трубопроводов, которое происходит под действием внешних факторов, в изоляционном защитном слое могут образовываться места, где изоляция нарушается настолько, что происходит утечка электрического тока под действием защитного потенциала трубы. Эти процессы приводят к уменьшению защитного потенциала подземных трубопроводов, а следовательно, к ухудшению защищенности подземных коммуникаций. Выявление мест и определения степени повреждения защитного покрытия трубопроводов является вопросом достаточно важным. Такие места фиксируются съемкой распределения электрического потенциала «труба-земля»

( $U_{mз}$ ) вдоль трассы трубопровода и «поперечного градиента» электрического поля. Поскольку места утечки электрического тока являются источниками электрических полей, то важно знать особенности этих полей для оценки степени и размеров повреждений.

В работе выполнен принципиальный анализ полей утечек тока разных типов – точечного, линейного, поверхностного и дискового. Получен ряд принципиальных авторских разработок, направленных на улучшение как методики электрометрических экспериментальных исследований в аномальных местах возможных повреждений изоляционного покрытия трубопроводов, так и интерпретации экспериментальных данных с целью определения глубин и силы тока утечек. Обработаны данные электрометрических исследований на магистральном нефтепроводе «Кременчуг-Херсон», подтверждают эффективность выполненных в диссертации разработок.

**Ключевые слова:** трубопровод, коррозионное повреждение, потенциал «труба-земля», продольный градиент, поперечный градиент, утечка тока.

### SUMMARY

**Y. Hloba "Application of electrometric technologies to assess the state of underground communications of the oil and gas industry". – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Thesis for the degree of a candidate of geological sciences on the specialization 04.00.22 – "Geophysics". – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

Main pipelines are capital engineering structures intended for continuous regulated transport of gas, oil, petroleum products, and others over long distances.

The role of pipeline transport in the country's economy is increasing steadily. This circumstance determines the requirement for the reliability of pipeline systems. It should be noted that the problem of ensuring the efficiency and reliability of main pipelines is multidimensional, but one of the main issues is effective corrosion protection, as the main cause of failures (accidents, etc.) on the linear part of main pipelines is corrosion destruction of the pipe body.

As a result of underground pipelines' protective insulation layer aging, which occurs under the influence of external factors, in the protective layer can be formed places where the insulation is damaged which occur leakage of electric current under the protective potential of the pipe. These processes lead to a decrease in the protective potential of underground pipelines, and further deterioration in the insulation of underground communications. Identifying locations and determining the degree of pipelines' protective covering damage is a very important issue. Such places are fixed by surveying the electric potential "pipe-to-soil" ( $U_{ps}$ ) distribution along the pipeline and by measuring "transverse gradient" of the electric field, which is the potential difference  $\Delta U_{MN}$ , measured by a line  $MN$  with a size of 5-10 m, oriented across the pipeline. Since the places of electric current leakage are sources of electric fields, it is important to know the features of these fields in order to assess the degree and size of damage.

The thesis considers the author's solutions of problems about electric fields of point, linear and surface sources within the simplified model, which assumes the location of pipes in a homogeneous half-space with resistivity  $\rho$  and does not consider the influence of underground communications on the field structure. Of course, such a model of the problem is quite simplified, at the same time it allows to perform damage estimates in the first approximation.

Analyses of the performed research results allow us to conclude that interpretation algorithms based on the theoretical model of the point damage field can be used to determine the depths and electrical current leakage from linear and surface damage under certain conditions. It is also obtained the conclusion about the dependence of the accuracy of determining the sizes of the linear damage  $2l$  on the coordinates of the extremum points of the longitudinal gradient graphs from the ratio of these sizes to the depth of damage  $h$ .

As part of the thesis research, a number of basic author's developments performed for improving both the methodology of electrometric experimental research in anomalous places of possible underground pipelines' insulating covering damage, and the interpretation of the obtained experimental data. It was processed a significant amount of data, primarily electrometric research on the Kremenchuk-Kherson main oil pipeline, where practical results were obtained, confirming the effectiveness of the developments made in the thesis.

**Keywords:** pipeline, corrosion damage, "pipe-to-soil" potential, longitudinal gradient, transverse gradient, current leakage.