

## ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ НА ОПІР РОЗТІКАННЮ СТРУМУ

Вінницький національний технічний університет

*Для забезпечення та підвищення надійності розподільних сталевих підземних газових мереж середнього тиску необхідно передбачити в процесі розробки проекту системи газопостачання або в період їх введення в експлуатацію застосування організаційно-технічних та технологічних заходів, щодо захисту сталевих трубопроводів від негативної дії електрохімічної ґрунтової корозії. Поширеним способом електрохімічного захисту на протяжних ділянках сталевих підземних газопроводів є встановлення по трасі потужних установок катодного захисту з використанням глибинних анодних заземлювачів, які виготовлено з металонасиченого бетону.*

*В роботі представлено дослідження впливу параметрів анодного заземлювача з металонасиченого бетону станції катодного захисту підземних сталевих газопроводів на його опір розтіканню струму. Виконано математичне планування експерименту, щодо встановлення та дослідження факторів, що впливають на умови захисту трубопроводів від ґрунтової корозії. Отримано рівняння регресії для цільової функції – опору розтікання струму, яке може бути використане для технічного моделювання заземлення, а також під час розробки методики інженерних розрахунків його параметрів. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – опору розтікання струму та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу: довжини анодного заземлення, відстані від поверхні землі до його середини та питомого електричного опору ґрунту, де заземлювач буде розміщено. Встановлено доцільність використання анодних заземлювачів з металонасиченого бетону для підвищення надійності електрохімічного захисту газопроводів. Виявлено пріоритетність параметрів анодного заземлювача по відношенню до опору розтікання струму: найбільш впливовий питомий електричний опір ґрунту, а найменше – відстань від поверхні землі до середини анодного заземлювача.*

*Ключові слова:* газопровід, катодний захист, анодний заземлювач, ґрунтова корозія, опір розтіканню струму, надійність.

### Вступ

Газотранспортна система України включає 39,8 тис. км газопроводів різного призначення та продуктивності, 74 компресорні станції (КС), понад 1600 газорозподільних станцій, 13 підземних сховищ газу (ПСГ) та об'єкти інфраструктури, що забезпечують функціонування системи. Близько 16 тис. км розподільчих газопроводів (або 7%) та 7,3 тис. газорегуляторних пунктів (або близько 11,5%) вже відпрацювали свій амортизаційний термін, морально і технічно застаріли. Рівень електрохімічного захисту підземних сталевих газопроводів складає 91% [1]. Основною причиною відмов і аварій на газопроводах є ґрунтова корозія металу, тому їхня працездатність і надійність залежить від рівня розвитку засобів протикорозійного захисту. Вагомим фактором, що зменшує швидкість корозійних процесів при експлуатації підземних трубопроводів, являється активний електро-хімічний захист, що застосовується в комплексі з ізоляційним покриттям. Довговічність та надійність підземних споруд системи газопостачання безпосередньо залежить від правильного вибору та якості систем протикорозійного захисту, що застосовуються.

Поширеним способом електрохімічного захисту на протяжних ділянках сталевих газопроводів є встановлення по трасі через 7-10 км потужних установок катодного захисту з використанням глибинних анодних заземлювачів. Основною перевагою системи електрохімічного захисту, що включає глибинні анодні заземлювачі і катодні станції, є оптимальні витрати на будівництво і підтримка їх працездатності. Анодний заземлювач є одним з найважливіших елементів катодного захисту [2, 3].

**Метою роботи** є планування багатофакторного експерименту при дослідженні впливу параметрів анодного заземлення на опір розтіканню струму для встановлення можливості правильного вибору типу анодного заземлювача та розташування його по відношенню до об'єкту, що захищається.

### Основна частина

Попередні дослідження виявили, що конструкція глибинного анодного заземлювача з металонасиченого бетону [4, 5] має ряд переваг в порівнянні з такими традиційними елементами катодного захисту, як сталеві анодні заземлювачі з коксовими активаторами, графіт просочений воском або смолами та аноди з використанням сплавів свинцю та алюмінію. Недоліками наведених вище анодних заземлювачів є значна конструктивна складність, висока матеріаловартість та трудовитрати при їх виготовленні. На відміну від них анодний заземлювач з металонасиченого бетону має ряд переваг: конструкція аноду дозволяє зменшити металоємність виробу та використовувати вторинні ресурси промисловості, що знижує їх вартість, а також розв'язується питання утилізації відходів основного виробництва. Завдяки конРисунокрації розвинутої зовнішньої поверхні корпусу – об'ємного блоку електропровідного бетону вдається досягти необхідної щільності та опору розтікання струму, що припадає на одиницю площі анодного заземлювача. Тому для вирішення поставленої мети використано основні параметри анодного заземлювача, який виконано з металонасиченого бетону.

Основним параметром анодного заземлювача по якому визначають ефективність його роботи є опір розтіканню струму з одиничного анодного стрижневого вертикального заземлювача [6, 7]:

$$R = \frac{\rho_z}{2\pi l_e} \left( \ln \frac{2l_e}{d_e} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l_e}{4h - l_e} \right) \quad (1)$$

де  $l_e$  – довжина одного заземлювача, м;

$h$  – відстань від поверхні землі до середини одного заземлювача, м;

$d_e$  – діаметр анодного заземлювача;

$\rho_z$  – питомий електричний опір ґрунту, Ом·м.

Аналіз формули (1) свідчить, що опір розтіканню струму є функцією від  $l_e$ ,  $h$ , та  $\rho_z$  – факторів впливу на процес електрохімічної захисту газопроводу від ґрунтової корозії:

$$R = f(l_e, h, \rho_z) \quad (2)$$

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на опір розтіканню струму при проведенні однофакторних експериментів пов'язаний із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівняння регресії для функцій відгуку – опір розтіканню струму за допомогою планування багатофакторного експерименту методом Бокса-Уілсона [8].

Вибір діапазонів варіювання факторів функції (2) проводився таким чином, щоб будь-яка їх сукупність в передбачених планом експерименту діапазонах могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані. Всі відзначені фактори, які входять в функції (2), є величинами, що мають різну розмірність, а значення величин цих факторів мають різні порядки. Тому для отримання поверхні відгуку цієї функції було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (3)$$

В результаті проведених пошукових експериментів для кожного фактора визначено значення:  $X_{j0}$  – основний рівень фактора та  $I_j$  – інтервал варіювання. Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний  $-1$ , середній  $0$ , максимальний  $+1$  та зіркові значення  $-1,681$ ,  $+1,681$ . Істинні значення факторів, встановлені на основі проведення пошукових експериментів, наведені в табл. 1.

Кількість дослідів для багатофакторного експерименту для квадратичної регресії визначалась за формулою:

$$N = 2^k + 2k + N_0(k), \quad (4)$$

де  $k$  – кількість факторів;

2 – кількість рівнів варіювання;

$N_0$  – кількість дослідів в центрі плану,  $N_0(k) = N_0(3) = 6$ .

Для нашого випадку  $N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 6 = 20$  дослідів.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,681	-1	0	+1	+1,681	
$x_1$ – довжина одного заземлювача, м	0,319	1	2	3	3,681	1
$x_2$ – відстань від поверхні землі до середини одного заземлювача, м	1,1595	1,5	2	2,5	2,8405	0,5
$x_3$ – питомий електричний опір ґрунту, Ом·м.	2,76	30	70	110	137,24	40

Планується отримати наступну квадратичну регресійну модель із ефектами взаємодії 1-го порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{33}x_3^2, \quad (5)$$

де  $y$  – цільова функція (опір розтіканню струму);

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{13}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$  – коефіцієнти регресії.

Для визначення токових оцінок  $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{13}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$  використовувався метод найменших квадратів.

Згідно рекомендацій авторів робіт [9] довірча ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при  $n_{відк}=0$ :

$$n \geq \frac{1 + (0,8 \dots 0,9)}{1 - (0,8 \dots 0,9)} = 9 \dots 19.$$

Для функції відгуку – опір розтіканню струму рівняння регресії згідно проведеного багатфакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$y = 15,91 - 4,944x_1 - 0,4361x_2 + 9,67x_3 - 0,0325x_1x_2 - 2,833x_1x_3 - 0,235x_2x_3 + 1,344x_1^2 + 0,193x_2^2 + 0,0658x_3^2. \quad (6)$$

За критерієм Стюдента виявились незначимими ефекти взаємодії 1-го порядку  $x_1x_2, x_2x_3$  та квадратичні ефекти  $x_2^2, x_3^2$ . Після відкидання факторів із незначимими коефіцієнтами регресії рівняння регресії для функції відгуку – опір розтіканню струму в кодованих значеннях виглядає таким чином:

$$y = 15,91 - 4,944x_1 - 0,4361x_2 + 9,67x_3 - 2,833x_1x_3 + 1,344x_1^2. \quad (7)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку – опір розтіканню струму має вигляд:

$$R = 6,244 - 5,365l_e - 0,8722h + 0,3834\rho_2 - 0,0708V_e\rho_2 + 1,344l_e^2. \quad (8)$$

При цьому  $S_{відм}^2 = 0,154$ ;  $S_{ад}^2 = 0,6588$ ;  $F = 4,28 < [F] = 4,42$ , отже за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (8) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав  $R=0,9980$ , що свідчить про високу достовірність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента найбільше на опір розтіканню струму впливає питомий електричний опір ґрунту, а найменше – відстань від поверхні землі до середини одного заземлювача.

Отримане рівняння регресії (8) може бути використане під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів заземлення.

На рис. 1 показано поверхні відгуків цільової функції – опору розтіканню струму та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу.

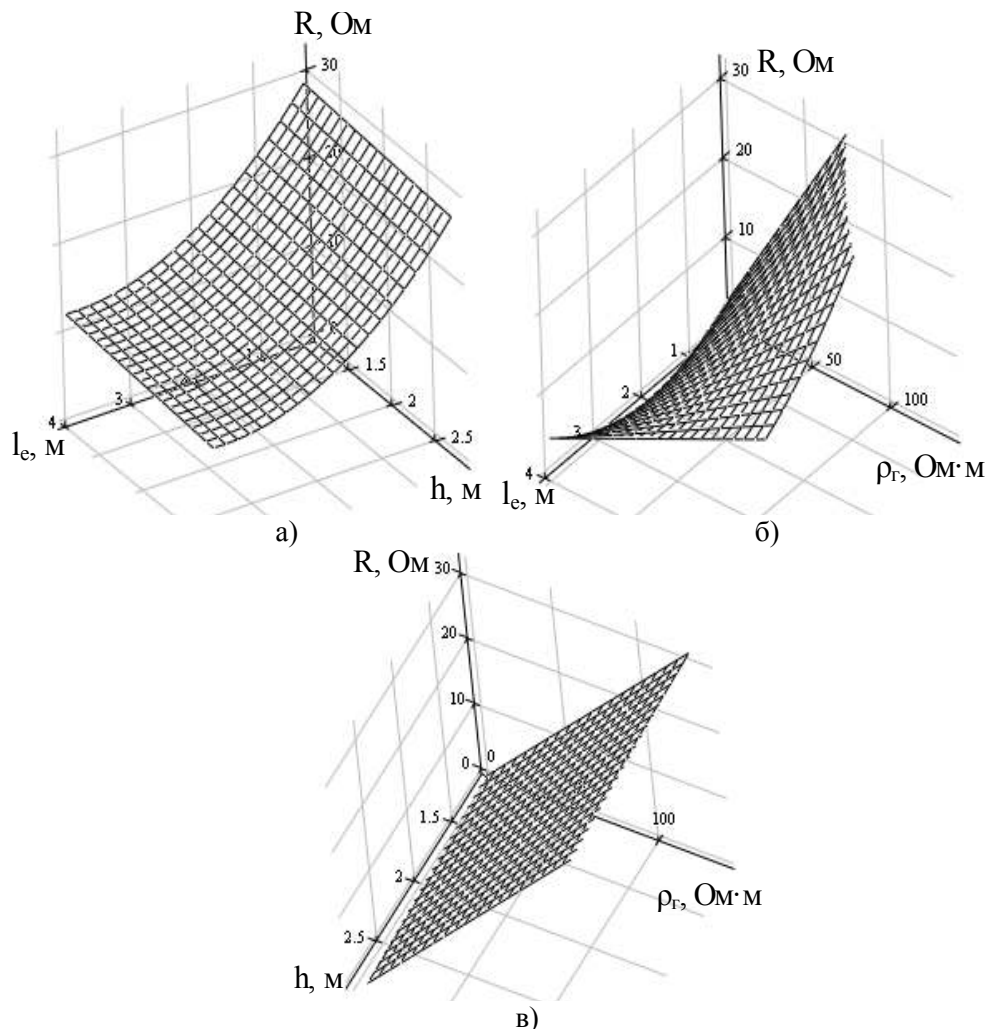


Рисунок 1 – Поверхні відгуків цільової функції – опір розтіканню струму та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу: а)  $l_e - h$ ; б)  $l_e - \rho_g$ ; в)  $h - \rho_g$

Отримані поверхні відгуків цільової функції – опору розтікання струму дозволяють наглядно проілюструвати залежність даної цільової функції від окремих параметрів впливу: довжини одного заземлювача, відстані від поверхні землі до середини одного заземлювача та питомого електричного опору ґрунту.

### Висновки

З метою підвищення надійності розподільних газових мереж необхідно передбачити при розробленні проекту систем газопостачання або в період їх експлуатації впровадження організаційно-технічних заходів, щодо захисту сталевих трубопроводів від негативної дії електрохімічної корозії. Доцільним при влаштуванні установок захисту трубопроводів від дії електрохімічної корозії є використання технології та матеріалів, які дозволяють зменшити затрати коштів на їх виготовлення та експлуатацію.

Для аналізу факторів простору залежності цільової функції – опору розтікання струму анодного заземлювача, та незалежних змінних виконано математичне планування експерименту, щодо встановлення та дослідження факторів, що впливають на умови захисту трубопроводів від електрохімічної корозії. За результатами регресійного аналізу виявлено, що найбільше на опір розтіканню струму впливає питомий електричний опір ґрунту, а найменше – відстань від поверхні землі до середини анодного заземлювача.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко В. А. Газопостачання: підручник / Ткаченко В. А., Склярєнко О. М. – ІВНВКП «Укреліотех», 2012. – 588с. – ISBN 978-966-2216-08-0
2. Ратушняк Г. С. Глибинний анодний заземлювач із зменшеною металоємністю / Г. С. Ратушняк, О. І. Ободянська // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – № 1(12). – С. 62–65.
3. Ратушняк Г. С. Управління змістом проєктів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж: монографія / Г. С. Ратушняк, О. І. Ободянська. – Вінниця, 2014. – 128 с. – ISBN 978-966-641-582-3.
4. Патент України № 73073, МПК C23 F13/00 / Ратушняк Г.С., Слюсаренко Р.П., Ободянська О.І. Глибинний анодний заземлювач. Бюл. №17, 2012 р.
5. Патент України № 74372, МПК C23 F13/00 / Ратушняк Г.С., Слюсаренко Р.П., Ободянська О.І. Глибинний анодний заземлювач. Бюл. №20, 2012 р.
6. Защита трубопроводов от коррозии : учеб. пособ. Том 1 / [Ф. М. Мустафин, М. В. Кузнецов, Г. Г. Васильев и др.]. – СПб. : Недра, 2005. – 620 с.
7. Экилик Г. Н. Электрохимические методы защиты металлов / Г. Н. Экилик. – Ростов-на Дону, 2004. – 52 с.
8. Авдеев О. Н. Моделирование систем: Учебное пособие / О. Н. Авдеев, Л. В. Мотайленко. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 169 с.
9. Грабар І. Г. Теорія та технологія наукових досліджень: Навч. посібник / І. Г. Грабар, Г. П. Водяницький. – Житомир: ЖДТУ. – 2013. – 260 с.

## REFERENCES

1. Tkachenko V. A. Hazopostachannya: pidruchnyk / Tkachenko V.A., Sklyarenko O.M. – IVNVKP «Ukrheliotekh», 2012. – 588s. – ISBN 978-966-2216-08-0
2. Ratushnyak H. S. Hlybynnyu anodnyu zazemlyuvach iz zmenshenoyu metaloyemnistyu / H. S. Ratushnyak, O. I. Obodyans'ka // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytsvi. – 2012. – № 1(12). – S. 62–65.
3. Ratushnyak H. S. Upravlinnya zmistom proektiv iz zabezpechennya nadiynosti zovnishnikh hazorozpodil'nykh merezh: monohrafiya / H. S. Ratushnyak, O. I. Obodyans'ka. – Vinnytsya, 2014. – 128 s. – ISBN 978-966-641-582-3.
4. Patent Ukrayiny № 73073, MPK C23 F13/00 / Ratushnyak H.S., Slyusarenko R.P., Obodyans'ka O.I. Hlybynnyu anodnyu zazemlyuvach. Byul. №17, 2012 r.
5. Patent Ukrayiny № 74372, MPK C23 F13/00 / Ratushnyak H.S., Slyusarenko R.P., Obodyans'ka O.I. Hlybynnyu anodnyu zazemlyuvach. Byul. №20, 2012 r.
6. Zashchyta truboprovodov ot korrozyy : ucheb. posob. Tom 1 / [F. M. Mustafyn, M. V. Kuznetsov, H. H. Vasyl'ev y dr.]. – SPb. : Nedra, 2005. – 620 s.
7. Ékylyk H. N. Élektrokhymycheskiye metody zashchyty metallov / H. N. Ékylyk. – Rostov-na Donu, 2004. – 52 s.
8. Avdeev O. N. Modelyrovanye system: Uchebnoe posobyie / O. N. Avdeev, L. V. Motaylenko. – SPb.: Yzd-vo SPbHTU, 2001. – 169 s.
9. Hrabar I. H. Teoriya ta tekhnolohiya naukovykh doslidzhen': Navch. posibnyk / I. H. Hrabar, H. P. Vodyanyts'kyu. – Zhytomyr: ZHDTU. – 2013. – 260 s.

**Ратушняк Георгій Сергійович** – кандидат технічних наук, професор, декан факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, e-mail: ratushnyak.gs@i.ua.

**Ободянська Ольга Ігорівна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерних систем в будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: olha.obodyanska@i.ua.

**G. Ratushniak**

**O. Obodianska**

## PLANNING OF MULTI-FACTOR EXPERIMENTAL IN THE INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE ANODIA GROWTH PARAMETERS FOR CURRENT TREATMENT

Vinnytsia National Technical University

*In order to ensure and increase the reliability of distribution medium steel underground gas networks, it is necessary to provide for the development of the project of the gas supply system or during the period of their putting into operation of the application of organizational, technological and technological measures to protect steel pipelines against the negative effects of electrochemical ground corrosion. The widespread method of electrochemical protection on extended sections of steel underground gas pipelines is the installation of high-power cathodic protection plants using deep anode earthing systems made of metal-coated concrete.*

*The paper presents the study of the influence of parameters of anode earthing from metal-bearing concrete at the station of cathodic protection of underground steel gas pipelines on its resistance to current deformation. The mathematical planning of the experiment is carried out in relation to the establishment and research of factors influencing the conditions for the protection of pipelines from soil corrosion. The regression equation for the target function is obtained – current propagation resistance, which can be used for technical grounding simulation, as well as during the*

development of a methodology for engineering calculations of its parameters. The surface of the response of the target function – the resistance of the current spreading and its two-dimensional cross sections in the planes of the influence parameters: the length of the anode ground, the distance from the surface of the earth to its center and the specific electrical resistance of the ground, where the earthing switch will be placed, is constructed. The expediency of using anode earthing from metal-saturated concrete has been established to increase the reliability of electrochemical protection of gas pipelines. The priority of parameters of the anode earthing was determined in relation to the current propagation resistance: the most influential specific electrical resistance of the soil, and the least – the distance from the surface of the earth to the middle of the anode earthing.

*Key words:* gas pipeline, cathode protection, anode earthing, ground corrosion, resistance to current emission, reliability.

**Ratushnyak Georgiy** – PhD in engineering, professor, dean of the Faculty building, power engineering and gas supply, Vinnytsia National Technical University, e-mail: ratushnyak.gs@i.ua. ORCID 0000-0001-9656-5150.

**Obodianska Olha** – PhD in engineering, senior lecturer of department of Systems Engineering in construction, Vinnytsia National Technical University, e-mail: olha.obodyanska@i.ua. ORCID 0000-0003-4464-3537.

**Г. С. Ратушняк**

**О. И. Ободьянская**

## ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСТЕКАНИЯ ТОКА

Винницкий национальный технический университет

*Для обеспечения и повышения надежности распределительных стальных подземных газовых сетей среднего давления необходимо предусмотреть в процессе разработки проекта системы газоснабжения или в период их ввода в эксплуатацию применения организационно-технических и технологических мероприятий по защите стальных трубопроводов от негативного воздействия электрохимической почвенной коррозии. Распространенным способом электрохимической защиты на протяженных участках стальных подземных газопроводов является установление по трассе мощных установок катодной защиты с использованием глубинных анодных заземлителей, изготовленные из металлонасыщенного бетона.*

*В работе представлено исследование влияния параметров анодного заземления с металлонасыщенного бетона станции катодной защиты подземных стальных газопроводов на его сопротивление растеканию тока. Выполнено математическое планирование эксперимента по установлению и исследованию факторов, влияющих на условия защиты трубопроводов от почвенной коррозии. Получены уравнения регрессии для целевой функции – сопротивления растекания тока, которое может быть использовано для технического моделирования заземления, а также при разработке методики инженерных расчетов его параметров. Построены поверхности отзывают целевой функции – сопротивления растекания тока и их двумерные сечения в плоскостях параметров воздействия: длины анодного заземления, расстояния от поверхности земли до его середины и удельного электрического сопротивления грунта, где заземлитель будет размещено. Установлена целесообразность использования анодных заземлителей с металлонасыщенного бетона для повышения надежности электрохимической защиты газопроводов. Выявлено приоритетность параметров анодного заземления по отношению к сопротивлению растекания тока: наиболее влиятельный удельное электрическое сопротивление грунта, а наименьшее – расстояние от поверхности земли до середины анодного заземления.*

*Ключевые слова:* газопровод, катодная защита, анодный заземлитель, грунтовая коррозия, сопротивление растеканию тока, надежность.

**Ратушняк Георгий Сергеевич** – кандидат технических наук, профессор, декан факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения, Винницкий национальный технический университет, e-mail: ratushnyak.gs@i.ua.

**Ободьянская Ольга Игоревна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерных систем в строительстве, Винницкий национальный технический университет, e-mail: olha.obodyanska@i.ua.