

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЧИННИКІВ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ КАНАЛІЗАЦІЙНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Тетяна Аргатенко¹, Юрій Копаниця², Віктор Поліщук³

Київський національний університет будівництва і архітектури³¹,
Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

¹ канд. техн. наук, argatenko.tv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2516-2906

² канд. техн. наук, kopanytsia.iud@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-9470-1902

³ магістрант, polishchuk_viv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-9373-0453

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.41.9-18

Анотація. Каналізаційні системи є важливою складовою системи життєзабезпечення, які зокрема визначають екологічний стан в населеному пункті. Довговічність прокладеної мережі залежить від багатьох чинників, одним з яких є їх корозійна стійкість. З цим фактором також пов'язані кількість аварій на ділянці та число необхідних ремонтних робіт. Метою роботи було дослідження факторів, які мають найбільший вплив на корозостійкість каналізаційних трубопроводів, з метою підвищення терміну їх експлуатації та зменшення кількості аварій. Для аналізу використовувалась інформація, отримана під час практичної експлуатації каналізаційних трубопроводів міста Києва. Аналізувались дані групи трубопроводів діаметрами від 500 до 1500 мм. Планування активного експерименту зроблене на виборці даних за 25 років експлуатації. Представлене дослідження проведено у статистичному пакеті STATGRAPHICS. Проведено повний факторний експеримент. За результатами роботи було зменшено загальну кількість визначальних факторів. На основі методів статистичного аналізу отримано наступні висновки: встановлено статистично значущу залежність між використанням бетонної труби з малою швидкістю та найбільшою кількістю аварій трубопроводу. Матеріал трубопроводу та швидкість руху рідини в ньому виявились факторами, що мають найбільший вплив на термін експлуатації та кількість аварій на трубопроводі.

Ключові слова: корозійна стійкість, каналізаційні трубопроводи, повний факторний експеримент, дисперсійний аналіз, діаграми Парето, графік головних ефектів.

ВСТУП

Каналізаційні системи є важливою складовою системи життєзабезпечення, які зокрема визначають екологічний стан в населеному пункті. В більшості міст України каналізаційні колектори прокладені зі сталевих і залізобетонних труб. Довговічність прокладеної мережі залежить від багатьох чинників, одним з яких є їх корозійна стійкість. З цим фактором також пов'язані кількість аварій на ділянці та число необхідних ремонтних робіт. За літературними даними [1-3]

економічні збитки лише від корозії в світі сягають 10% внутрішнього валового продукту. Без ефективного контролю корозія може виявитися дуже дорогою для власника трубопроводу, оскільки має цілий ряд шкідливих наслідків: пошкодження та послаблення трубопроводів; необхідність коштовного ремонту або заміни труби; зниження терміну служби трубопроводів [4]. Також корозійні явища на каналізаційних колекторах порушують безпеку персоналу та спричиняють шкоду навколишньому середовищу.

Метою даної роботи було дослідження факторів, які мають найбільший вплив на корозійну стійкість каналізаційних трубопроводів, з метою підвищення терміну їх експлуатації та зменшення кількості аварій. Відомо, що не всі дані однакові. Часто невелике, але правильно сплановане дослідження дає більше інформації ніж велике, погано сплановане [5]. Використання статистично розробленого експерименту, встановлення послідовності дослідів дають найбільшу кількість інформації про вплив різних факторів та їх взаємодію, причому результат досягається в найменшій кількості експериментів [6].

АНАЛІЗ КОРОЗІЙНИХ ЧИННИКІВ

Корозія матеріалів є результатом їх взаємодії навколишнім середовищем. За механізмом процесів, що відбуваються, розрізняють хімічну, електрохімічну і біохімічну корозію. В умовах каналізаційних споруд

найбільш поширеною ймовірно є біологічна корозія з поступовим переходом до електрохімічного процесу [7, 8].

Дані, отримані під час експлуатації каналізаційних систем, свідчать, про значний вклад біодеструкції в процеси руйнування будівельних матеріалів, в тому числі бетону. Біологічна корозія бетону являє собою процес ушкодження бетону в результаті життєдіяльності мікроорганізмів, які оселяються на поверхні будівельних конструкцій. Біопшкодження мінеральних будівельних матеріалів зводяться до порушення зчеплення складових компонентів цих матеріалів.

Серед основних корозійних чинників, що діють на каналізаційні трубопроводи, слід відзначити також агресивне середовище стічних вод. Авторами [7, 8] було зібрано та проаналізовано дані щодо корозійних властивостей комунальних стічних вод різних регіонів України (табл. 1).

Таблиця 1. Корозійні характеристики стічних вод каналізаційних споруд
Table 1. Corrosion characteristics of wastewater from sewage facilities

Регіон України	рН	Загальна мінералізація, г/л	Хімічний склад, мг-екв/дм ³			
			Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ³⁻
Київська область	6,4	3,5	61,2	12	1584	8,5
Чернігівська область	5,7...6,9	3,65	153	23	2041	16,0
Одеська область	6,4	2,6	154	20,1	1570	12,6
Полтавська область	7,1	3,4	34,5	18,7	1273	22,8

Літературні дані [7, 8] свідчать, що найбільшою корозійною активністю щодо металів характеризуються сильно мінералізовані стічні води зі значним вмістом сульфатів та хлоридів.

Наявність ґрунтовних досліджень впливу біологічних та хімічних чинників на механізм та швидкість корозійних процесів дозволила в цьому дослідженні зосередитись на наборі таких параметрів, які легко піддаються нашому контролю. Отже для аналізу експериментальних даних було обрано такі фактори.

Матеріал трубопроводу – один із важливих факторів, який має прямий вплив на властивості трубопроводу і який ми можемо змінити для покращення корозостійкості та зменшення кількості аварій.

Швидкість трубопроводу – цей фактор ми можемо контролювати змінюючи діаметр або кут нахилу трубопроводу. Слід також враховувати, що при недостатній швидкості можливе замулювання труби, а при за великій – стирання матеріалу стінок.

Наявність напору в системі має значення у випадку корозійного ушкодження, коли

можливою стає втрата міцності труби та руйнування її під дією внутрішнього тиску.

Грунтові води можуть стати причиною корозії зовнішньої поверхні труби, через що швидкість руйнування трубопроводу збільшується.

Нами було поставлено завдання дослідити вплив на корозостійкість трубопроводу означених факторів. Для аналізу використовувалась інформація, отримана під час практичної експлуатації каналізаційних трубопроводів міста Києва. Для максимальної точності були вибрані групи трубопроводів, діаметрами від 500 до 1500 мм. Планування

Таблиця 2. Незалежні фактори
Table 2. Independent factors

Factors	Low	High	Units	Continuous
Material	concrete	steel		no
Speed	0,3	0,7		no
Pressure	yes	no		no
Groundwater	yes	no		no

У якості критерію оптимізації мінімізації аварій було вибрано такі фактори:

- матеріал трубопроводу – залізобетон / сталь;
- швидкість в трубопроводі – 0,3...0,7 м/с / 0,7...1,0 м/с;
- тип системи – напірна/ безнапірна;
- наявність ґрунтових вод навколо труби – немає ґрунтових вод / є ґрунтові води.

Для ПФЕ, відповідно, отримано план (2^4) – 16 прогонів. Для підвищення якості отриманих даних і виключення взаємного впливу між факторами під час проведення експерименту бажано задавати рандомізацію.

Згенеровано План експерименту, який вивчатиме вплив 4 факторів за 16 прогонів. План виконується одним блоком. Порядок експериментів у плані бажано рандомізувати. Останнє мінімізує приховані змінні, вони можуть спотворити результати.

активного експерименту зроблене на виборці даних за 25 років експлуатації.

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Представлене дослідження проведено у статистичному пакеті STATGRAPHICS. Проведено повний факторний експеримент [9-11]. Метою експерименту є виявлення за допомогою мінімальної кількості експериментальних прогонів, які змінні процеси (фактори) мають найбільший вплив на кінцевий продукт (надійність роботи).

Задано незалежні фактори – 4 фактори, два рівні зміни (табл. 2).

В експерименті нами використано вибірку вихідних даних, які отримано з великого об'єму практичних даних. У нашому випадку ми не включали функцію рандомізації. Стандартні похибки базуються на загальній похибці з 5% *d.f.*

Відповідно зі згенерованим планом (рис. 1) проведено дослідження, детальний аналіз результатів – оцінка ефектів і взаємодій – представлено у таблиці 3.

Стандартні похибки базуються на загальній похибці з 5 *d.f.* У цій таблиці наведено кожен із оцінених ефектів і взаємодій. Також показано стандартну похибку кожного з ефектів, яка вимірює помилку вибірки. Відзначимо також, що найбільший коефіцієнт інфляції дисперсії (*V.I.F.*) дорівнює 1,0. Для ідеально ортогонального дизайну всі фактори дорівнюватимуть 1.

Щоб побудувати оцінки в порядку зменшення важливості- використано «Діаграми Парето» (рис. 2).

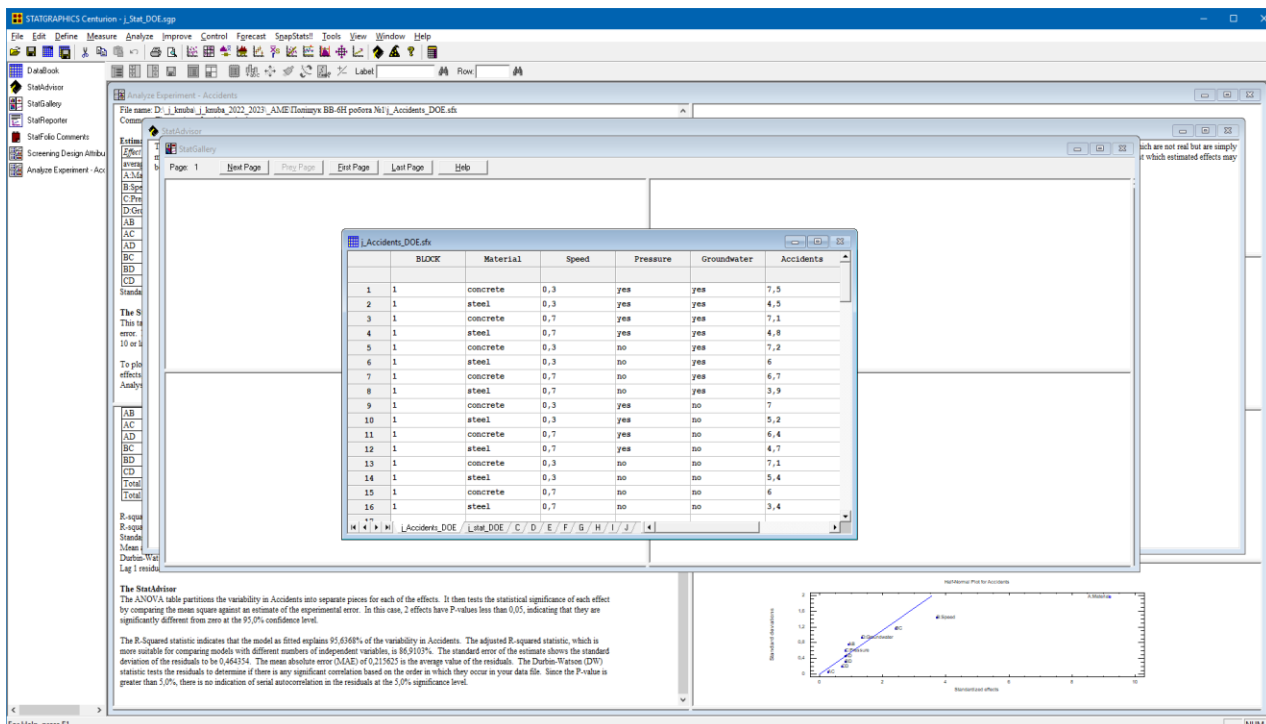


Рис. 1. План експерименту

Fig. 2. Experiment plan

Таблиця 3. Оцінка ефектів і взаємодій

Table 3. Evaluation of effects and interactions

Factors	Low	High	Units	Continuous
Material	concrete	steel		no
Speed	0,3	0,7		no
Pressure	yes	no		no
Groundwater	yes	no		no
Effect	Estimate	Std. Error	V.I.F.	
average	5,80625	0,116089		
A:Material	-2,1375	0,232177	1,0	
B:Speed	-0,8625	0,232177	1,0	
C:Pressure	-0,1875	0,232177	1,0	
D:Groundwater	-0,3125	0,232177	1,0	
AB	-0,2125	0,232177	1,0	
AC	0,0625	0,232177	1,0	
AD	0,1875	0,232177	1,0	
BC	-0,5625	0,232177	1,0	
BD	-0,1875	0,232177	1,0	
CD	-0,1625	0,232177	1,0	

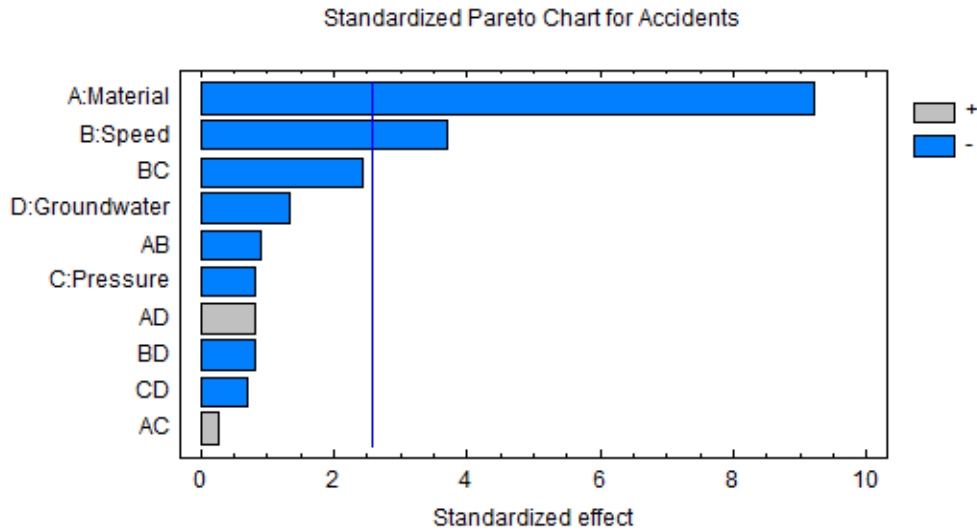


Рис. 2. Стандартизована діаграма Парето для відмов
Fig. 2. Standardized Pareto Chart for Accidents

Аналіз діаграми Парето показує, що є 2 важливі основні ефекти: матеріал труби та швидкість. Вони є статистично значущими для вибраного рівня значущості, встановленого за замовчуванням на 5%.

Перевірку статистичної значущості ефектів оцінено за допомогою дисперсійного аналізу (таб.4а, 4б).

Таблиця 4а. Аналіз дисперсії для аварій – кількість аварій у каналізаційній мережі

Table 4a. Analysis of Variance for Accidents – the number of accidents in the sewage network

R-squared = 95,6368 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 86,9103 percent
Standard Error of Est. = 0,464354
Mean absolute error = 0,215625
Durbin-Watson statistic = 2,77449 (P=0,7724)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,476848

Таблиця 4б. Дисперсійний аналіз

Table 4b. Analysis of variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Material	18,2756	1	18,2756	84,76	0,0003
B:Speed	2,97563	1	2,97563	13,80	0,0138
C:Pressure	0,140625	1	0,140625	0,65	0,4560
D:Groundwater	0,390625	1	0,390625	1,81	0,2361
AB	0,180625	1	0,180625	0,84	0,4020
AC	0,015625	1	0,015625	0,07	0,7985
AD	0,140625	1	0,140625	0,65	0,4560
BC	1,26563	1	1,26563	5,87	0,0599
BD	0,140625	1	0,140625	0,65	0,4560
CD	0,105625	1	0,105625	0,49	0,5152
Total error	1,07812	5	0,215625		
Total (corr.)	24,7094	15			

Таблиця дисперсійного аналізу розділяє мінливість аварій на окремі частини для кожного ефекту. Потім він перевіряє статистичну значущість кожного ефекту шляхом порівняння середнього квадрата з оцінкою експериментальної помилки. У цьому випадку 2 ефекти мають Р-значення менше 0,05, що вказує на те, що вони значно відрізняються від нуля на рівні довіри 95,0%.

Статистика R-квадрат показує, що встановлена модель пояснює 95,6368% мінливості аварій трубопроводу. Скоригована статистика R-квадрат, яка більше підходить для порівняння моделей з різною кількістю незалежних змінних, становить 86,9103%. Стандартна помилка оцінки показує, що стандартне відхилення залишків становить 0,464354. Середня абсолютна похибка (MAE) 0,215625 є середнім значенням

залишків. Статистика Дарбіна-Ватсона (DW) перевіряє залишки, щоб визначити, чи існує якась суттєва кореляція на основі порядку їх появи у файлі даних. Оскільки Р-значення перевищує 5,0%, немає ознак послідовної автокореляції в залишках на рівні значущості 5,0%.

Тільки два фактори мають статистично значущий вплив на функцію відгуку – аварії на трубопроводі й підтверджує аналіз, який отримано за допомогою карт Парето.

Ми маємо звернути увагу на матеріал труби й наповнення (швидкість). Ми бачимо у верхніх двох рядках відповідний параметр "р", який дає величину меншу 5%.

Графік ефектів всіх факторів представлено на рисунку 3. Аналіз впливу головних ефектів на «кількість відмов» представлено на рис. 4.

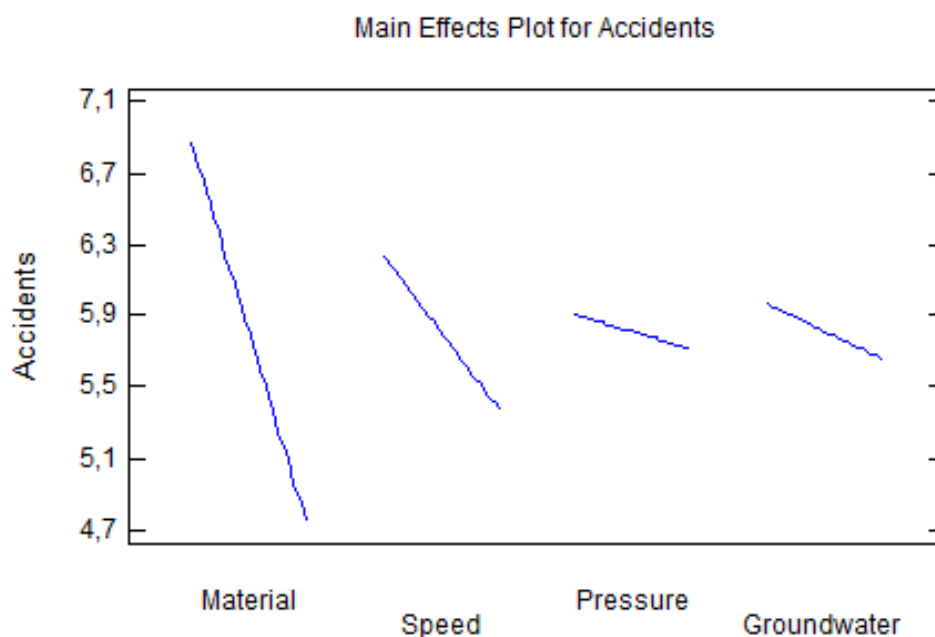


Рис. 3. Графік ефектів всіх факторів.

Fig. 3. Graph of effects of all factors

На основі Дисперсійного аналізу нами зроблено висновки, що найбільший ефект на "відмови" дають матеріал труби (Бетон) та наповнення 0,3.

Вплив зміни матеріалу труби та наповнення (швидкості) на відмови (рис. 4). Кожен фактор переміщується від свого

низького рівня до свого високого рівня. Зауважимо, що два фактори визначені нами основними на основі Дисперсійного аналізу та аналізу Карт Парето, мають найбільший вплив на відповідь, ніж інші.

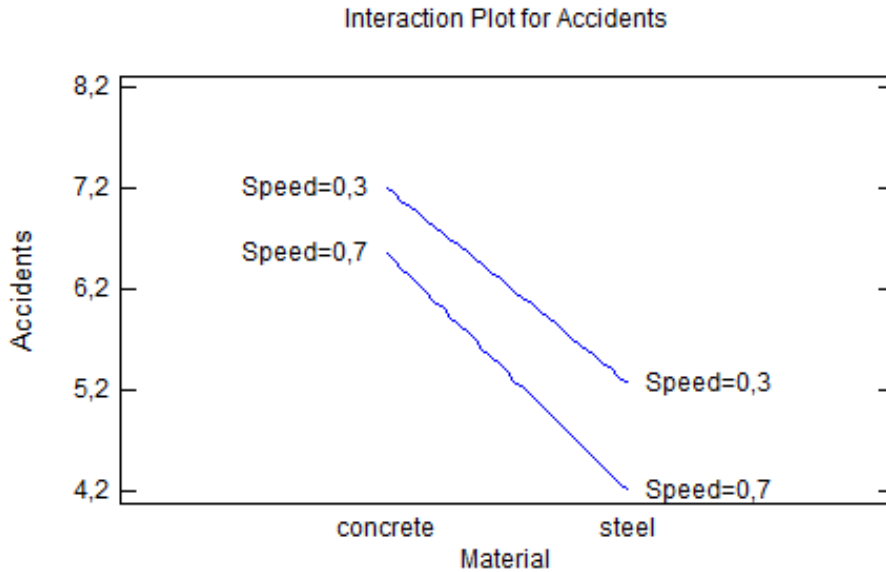


Рис. 4. Графік головних ефектів – «матеріал труби» та «швидкість».
Fig. 4. Graph of the main effects – “pipe material” and “velocity”

Розглянемо *Interaction Plot* (рис. 4) – вплив саме обраних нами основних факторів. На графіку ми бачимо, що найбільший вплив на "відмови" має: матеріал труби – бетон при малих (наповненнях) швидкостях води.

Для більш детального аналізу та відокремлення впливу основних факторів по відношенню до «шуму», за умови, що в нашому випадку мало ступенів свободи для оцінки експериментальної похибки, використано графік *Half-Normal Plot* (рис. 5).

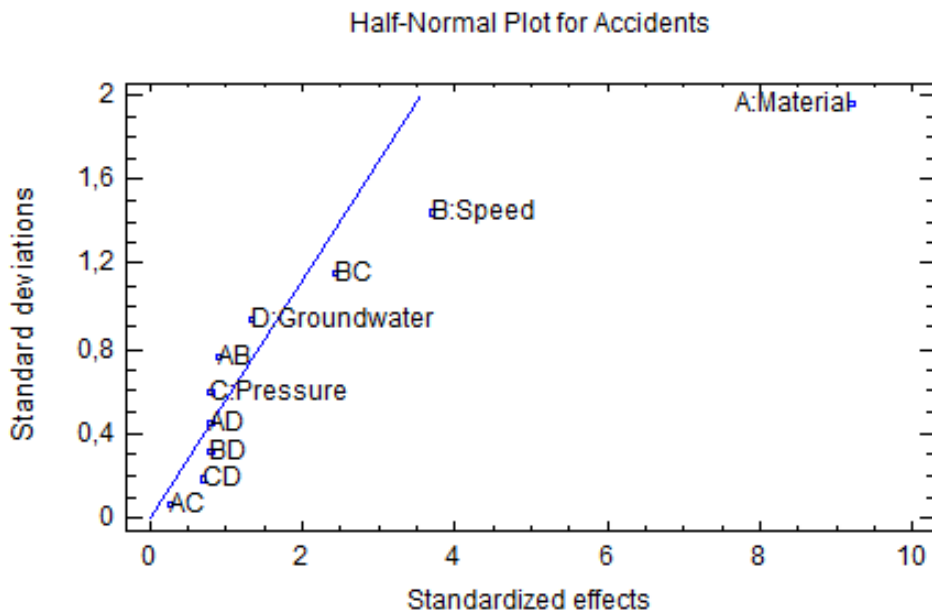


Рис. 5. Напівнормальний графік порівняння відносної величини ефектів і виявлення важливих ефектів цих експериментів, за умови, що оцінка похибки експерименту недоступна

Fig. 5. Half-Normal Plot. Compare the relative magnitude of effects, and to identify important effects from these experiments when no estimate of error from the experiment is available.

Графік *Half-Normal Plot* (рис. 5) використано для підтвердження результатів Дисперсійного аналізу. Використано у якості резервної копії таблиці ANOVA (табл. 4)

Загальний вигляд результатів проведення планування експерименту й основні результати Дисперсійного аналізу, Нормальні графіки розподілу, карти Парето, графіки ефектів тощо представлено на рис. 6.

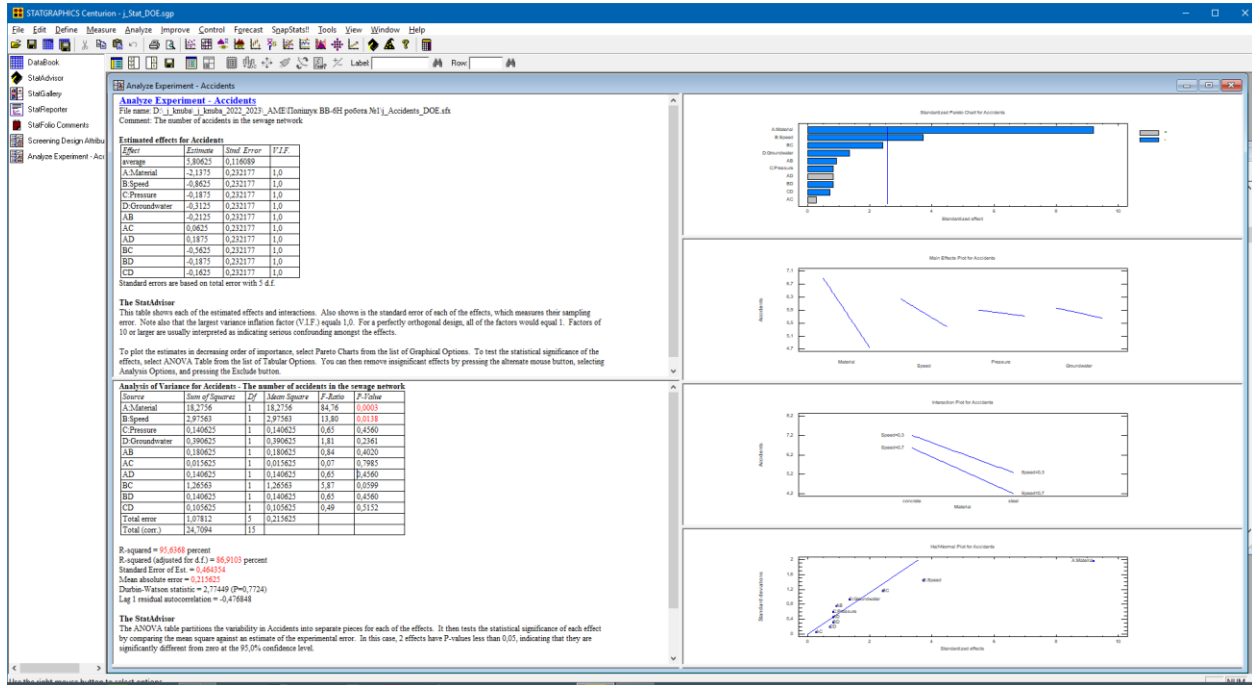


Рис. 6. Результати аналізу Повного факторного експерименту у програмі Statgraphics
Fig. 6. Results of the analysis of the Full factorial experiment in the Statgraphics program

Вікно аналізу дизайну експерименту на рис. 6. Вікно відображає такі чотири панелі.

1. Резюме аналізу: перераховані основні ефекти та взаємодії.
2. Таблиця ANOVA: містить P-значення, які можна використовувати для перевірки статистичної значущості кожен ефект.
3. Стандартизована діаграма Парето: відображення ефектів у порядку зменшення значущості лінією за допомогою якого можна визначити, які ефекти є статистично значущими.
4. Діаграма основних ефектів: графічно оцінюється зміна відповіді, коли кожен із факторів є перемістився з низького рівня на високий.

ВИСНОВКИ

Генерація плану повного факторного експерименту (план 2^4) проведена в статистичному пакеті *Statgraphics Centurion v15*. Обробка результатів експерименту виконана за алгоритмами стандартного модуля

планування експерименту, задіяний Дисперсійний аналіз, проведений аналіз графіку карти Парето. Також побудовані та проаналізовані графіки *Half-Normal Plot*, отримані вибіркові графіки взаємодії всіх пар ефектів. Взаємодії факторів не виявлено.

За результатами роботи було зменшено загальну кількість факторів. На основі методів статистичного аналізу зроблено такі висновки.

1. Встановлено статистично значущу залежність між використанням бетонні труби з малою швидкістю та найбільшою кількістю аварій трубопроводу. Матеріал трубопроводу та швидкість в ньому виявились факторами, що мають найбільший вплив на термін експлуатації та кількість аварій на трубопроводі.
2. Виявлено сумісний вплив факторів швидкості та тиску.
3. Зменшено загальну кількість чинників, що дає змогу спростити подальші дослідження, до прикладу, планування

екстремального експерименту за методом Бокса-Уилсона з отриманням поверхні відгуку дозволить провести подальші детальні дослідження означених факторів [12].

ЛІТЕРАТУРА

1. **Корольов П. В.** Науково-методичні та прикладні засади управління корозійною захищеністю основних фондів промислових підприємств // Ефективна економіка, 2017. №12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5958>
2. **Савенко В. І., Висоцька Л. М., Федоренко С. В.** Боротьба з корозією металів екологічно чистими засобами // Економіка та держава, 2018. № 10. С. 63–67. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2018.10.63>
3. **Макаренко В., Хоружий В., Любенко В., Максимов С., Осадчий В., Недашковський І.** Дослідження впливу біологічної корозії на міцність сталевих конструкцій гідротехнічних споруд тривалої експлуатації в агресивних середовищах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2021. Вип. 36. С.27-38. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.36.27-38>
4. **Chanda S.** Pipeline Corrosion and its Mitigation. In *Petroleum Pipelines: A Handbook for Onshore Oil and Gas Pipelines*, 2013, 183-218. Foundation Books. <https://doi.org/10.1017/9789382993261.007>
5. **Montgomery D. C., Runger G. C.** Applied Statistics and Probability for Engineers (2nd ed.). New York: Wiley, 2002. 720 p.
6. **Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L.** Probability & Statistics for Engineers & Scientists, Global Edition (9th ed.). London: Pearson, 2016. 816 p.
7. **Поліщук В.** Корозійно-біологічні ушкодження каналізаційних трубопроводів тривалої експлуатації. Конкурсна робота. КНУБА, 2021.
8. **Корозійно-механічна тріщиностійкість залізобетонних конструкцій: Монографія / В. Д. Макаренко, В. І. Гоц, С. Ю. Максимов і ін.** // Київ: НУБіП, 2022. 300 с. ISBN5-8366-1362-8.
9. **Montgomery D. C.** Statistical process control: Introduction to Statistical Quality Control (8th ed). New York: John Wiley and Sons. 2019. 768 p. ISBN: 978-1-119-39930-8.
10. **Box G. E. P., Hunter J. S., Hunter W. G.** Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience. 2005. 633 p. ISBN: 978-0-471-71813-0.

11. **Montgomery D. C.** Design and Analysis of Experiments (10th ed). New York.:Wiley, 2019. 688 p. ISBN: 978-1-119-49244-3.
12. **Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M.** Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (Wiley Series in Probability and Statistics) (4th ed). New York.:Wiley, 2016. 856 p. ISBN: 978-1-118-91601-8.

REFERENCES

1. **Korolov, P. (2017).** Scientific-methodical and applied basis of management of corrosion protection of fixed assets of industrial enterprises. *Efektivna ekonomika*, 12. Retrieved from <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5958>
2. **Savenko, V., Vysotskaya, L., & Fedorenko, S. (2018).** The fight against corrosion of metals by environmentally friendly means. *Ekonomika ta derzhava*, 10, 63–67. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2018.10.63>
3. **Makarenko, V., Khoruzhyy, V., Liubenko, V., Maksymov, S., Osadchyy, V., & Nedashkovs'kyi, I. (2021).** Research influence of biological corrosion on the strength of steel structures of hydrotechnical construction of long-term operation in aggressive environments. *Problems of water supply, sewage and hydraulics*, 36. 27-38. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.36.27-38>
4. **Chanda, S. (2013).** Pipeline Corrosion and its Mitigation. In *Petroleum Pipelines: A Handbook for Onshore Oil and Gas Pipelines*, 183-218. Foundation Books. <https://doi.org/10.1017/9789382993261.007>
5. **Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2002).** *Applied Statistics and Probability for Engineers* (2nd ed.). New York: Wiley. ISBN 10: 0470053046.
6. **Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2016).** *Probability & Statistics for Engineers & Scientists, Global Edition* (9th ed.). London: Pearson. ISBN-13: 9781292161419
7. **Polishchuk V. (2021).** *Corrosion and biological damage of sewage pipelines during long-term operation*. Competition work. KNUCA. [in Ukrainian]
8. **Makarenko, V. D., Gots, V. I., Maksymov, S. Yu., and others. (2022).** *Corrosion-mechanical crack resistance of reinforced concrete structures: Monograph*. Kyiv. ISBN5-8366-1362-8. [in Ukrainian]
9. **Montgomery, D. C. (2019).** *Statistical process control: Introduction to Statistical Quality Control*

(8th ed). New York: John Wiley and Sons. ISBN: 978-1-119-39930-8.

10. **Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005).** *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery* (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience. ISBN: 978-0-471-71813-0.

11. **Montgomery, D. C. (2019).** *Design and Analysis of Experiments* (10th ed). New York: Wiley, ISBN: 978-1-119-49244-3.

12. **Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016).** *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Wiley Series in Probability and Statistics) (4th ed). New York: Wiley. ISBN: 978-1-118-91601-8.

Analysis of the influence of factors on the corrosion resistance of the sewage pipeline

Tetiana Arhatenko, Yuri Kopanytsia, Viktor Polishchuk

Abstract. Sewage systems are an important component of the life support system, which, in particular, determine the ecological condition in the settlement. The durability of the laid network depends on many factors, one of which is their corrosion resistance. The number of accidents on the site and the number of necessary repairs are also related to this factor. The purpose of the work was to study the factors that have the greatest influence on the corrosion resistance of sewer pipelines, with the aim of increasing their service life and reducing the number of accidents. The analysis used information obtained during the practical operation of sewer pipelines in the city of Kyiv. The data of a group of pipelines with diameters from 500 to 1500 mm were analyzed. The planning of the active experiment was made on a sample of data for 25 years of operation. The presented study was carried out in the statistical package STATGRAPHICS. A full factorial experiment was conducted. According to the results of the work, the total number of determining factors was reduced. Based on the methods of statistical analysis, the following conclusions were obtained: a statistically significant relationship was established between the use of concrete pipes with low speed and the largest number of pipeline accidents. The material of the pipeline and the speed in it turned out to be the factors that have the greatest influence on the life of the pipeline and the number of accidents on the pipeline.

Key words: corrosion resistance, sewage pipelines, full factorial experiment, ANOVA, Pareto charts, main effects plot

Стаття надійшла до редакції 02.12.2022