

УДК 504.05

<https://doi.org/10.31713/ve1202516>

JEL: L23

Тригуба В. Ю. [1; ORCID ID: 0009-0001-2568-976X],

здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКИДІВ CO₂ У АЛЮМІНІЄВОМУ СЕКТОРІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ ARIMA: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

У статті проведено дослідження з елементами використання моделі ARIMA для прогнозування викидів CO₂ у металургійному секторі, зокрема в алюмінієвій промисловості. Аналіз охоплює часові ряди викидів за період 2005–2023 років із застосуванням сучасних методів оцінки стаціонарності та моделювання. Результати підтверджують ефективність ARIMA для ідентифікації короткострокових трендів, що є ключовими для впровадження стратегій декарбонізації. Підкреслюється важливість інтеграції ARIMA з іншими методами для підвищення точності прогнозування та сприяння сталому розвитку. Прогнозована тенденція зменшення зростання викидів CO₂ до 2050 року відповідає цілям Паризької кліматичної угоди та демонструє значний потенціал застосування «зелених» технологій у виробництві алюмінію зокрема відновлення виробництва в Україні.

Ключові слова: модель ARIMA; прогнозування CO₂; декарбонізація; алюмінієва промисловість; сталий розвиток.

Вступ. Алюміній, відкритий у 1808 році, є відносно молодим металом, але його значення у сучасній промисловості важко переоцінити. Сьогодні обсяги виробництва алюмінію перевищують сумарне виробництво всіх інших кольорових металів. Його фізичні властивості, зокрема ковкість, пластичність та низька температура плавлення (660° C), роблять його незамінним у багатьох галузях.

Інновація, яка стала проривом у виробництві алюмінію, – це електрохімічний процес Холла-Еру, запроваджений у 1886 році. Цей метод залишається домінуючим і донині, забезпечуючи понад 40 млн тонн чистого металу щороку. Основою цього процесу є електроліз глинозему (Al₂O₃), розчиненого в розплавленому кріоліті, під час якого вугільні аноди постійно використовуються. Хоча сучасні

електролізери демонструють високу ефективність та автоматизацію, вони все ще є джерелом викидів парникових газів, таких як CO₂ та CF₄.

Життєвий цикл алюмінію є прикладом ідеальної моделі сталого розвитку. Його широке застосування в енергетиці, будівництві, транспорті та інших галузях економіки демонструє, як технології можуть гармонійно поєднувати продуктивність та екологічну відповідальність. Завдяки своїм унікальним властивостям та високому потенціалу для переробки, алюміній залишається провідним матеріалом у процесі глобального переходу до низьковуглецевої економіки.

Наприкінці 1980-х років у США була заснована Асоціація алюмінію (AA), яка стала однією з перших організацій, що здійснили систематичну оцінку життєвого циклу (LCA) алюмінієвих виробів. У 2000 році Міжнародна асоціація алюмінію (IAA) опублікувала звіт, що базувався на аналізі життєвого циклу глобального первинного алюмінію. У ньому було детально розглянуто споживання енергії на різних етапах виробництва алюмінію та їхній вплив на зміну клімату. Цей звіт став основоположним у дослідженні екологічного сліду алюмінієвої промисловості та був оновлений у 2007 році [12].

Методологічна основа цих організацій дозволила не лише більш точно оцінювати вплив виробництва алюмінію на навколишнє середовище, але й сприяла впровадженню практик, спрямованих на підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів у межах концепції сталого розвитку.

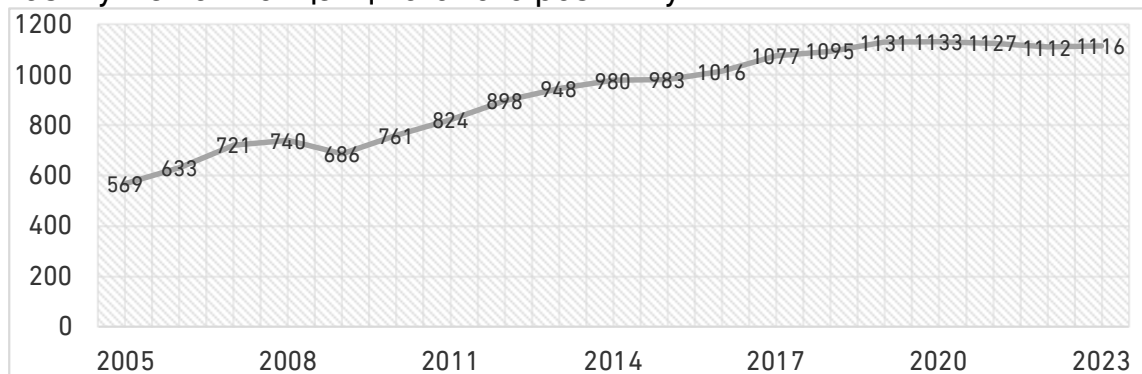


Рис. 1. Викиди CO₂ в алюмінієвому секторі (млн тонн)

Огляд літератури щодо використання ARIMA-методів у дослідженнях металургії. Методи аналізу часових рядів, зокрема ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average), займають важливе місце у сучасних дослідженнях, спрямованих на оптимізацію процесів

у металургії, підвищення енергоефективності та зменшення впливу на довкілля. Завдяки своїй здатності аналізувати обмежені масиви даних, ARIMA забезпечує точне виявлення трендів, сезонних змін і випадкових коливань, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих рішень у галузі, орієнтованій на сталий розвиток і декарбонізацію.

Дослідження застосування ARIMA у металургії зосереджуються на прогнозуванні ключових параметрів виробничих процесів, які безпосередньо впливають на енергоефективність та екологічну сталість. Наприклад, у роботах Peng успішно застосували модель ARIMA для прогнозування енергоспоживання в сталеливарній промисловості [4]. Цей підхід дозволив не лише скоротити споживання енергоресурсів, але й підвищити стабільність технологічних процесів, що є ключовим фактором для мінімізації викидів парникових газів.

Ще один приклад досліджень – робота Zhang, де ARIMA була використана для моделювання викидів CO₂ у процесах виплавки алюмінію [7]. Завдяки цій моделі вдалося розробити ефективні стратегії зменшення екологічного впливу, що підкреслює значний внесок ARIMA в управління викидами CO₂.

У дослідженнях Wang застосовано модель ARIMA для прогнозування хімічного складу сталі після плавлення як спосіб контролю якості. Ця модель дозволила вчасно коригувати виробничий процес, мінімізуючи рівень браку, знижуючи витрати та сприяючи раціональному використанню енергоресурсів. Такий підхід є важливим кроком у контексті сталого виробництва.

Окрім оптимізації внутрішніх процесів, ARIMA виявилася ефективною для аналізу ринкових трендів у металургійній галузі. Liu та ін. розробили ARIMA-модель для прогнозування коливань цін на алюміній, враховуючи сезонні ефекти та економічні цикли [7]. Це дозволило підприємствам адаптуватися до змін на ринку, забезпечуючи стійке зростання і зменшення залежності від несприятливих економічних умов. Також ці дослідження включали аналіз споживання первинного алюмінію, що допомогло оцінити вплив зростаючого попиту на екологічну стійкість.

Особливої уваги заслуговують дослідження Ramil Hasanov, Jamil Safarov, Arzu Safarli, які використовували ARIMA для моделювання тенденцій зростання викидів CO₂ у металургії. Їхній аналіз акцентував

необхідність інтеграції прогнозних моделей для розробки політик зменшення вуглецевого сліду галузі, що відповідає цілям Паризької угоди щодо клімату [1].

Таким чином, ARIMA-моделі є ефективним інструментом у металургійній промисловості для підвищення екологічної відповідальності, зменшення енергоємності процесів і сприяння сталому розвитку галузі. Їх використання дозволяє не лише прогнозувати критичні показники, але й реалізовувати довгострокові стратегії декарбонізації, зменшуючи вплив металургії на довкілля.

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні представлено дані щодо викидів алюмінію протягом його життєвого циклу (ALCE), що дозволяє оцінити вуглецевий слід, пов'язаний із глобальним алюмінієвим сектором. Набір даних, що охоплює період з 2005 по 2023 рік, надає комплексний огляд динаміки викидів CO₂ за цей часовий проміжок. Дані отримані з Міжнародного інституту алюмінію (IAI, 2023) і базуються на розрахунках у межах методології «Total-Cradle to Gate». Цей набір є ключовим джерелом для аналізу екологічних наслідків виробничих процесів у алюмінієвій промисловості, забезпечуючи міцне підґрунтя для подальших досліджень у сфері сталого розвитку та декарбонізації.

Таблиця 1

Описове статистичне подання (ALCE In Level)						
Mean	Median	Maximum	Minimum	Std. Dev.	Skewness	Kurtosis
<i>Ramil Hasanov, Jamil Safarov, Arzu Safarli 2005–2022 роки</i>						
913,00	964,00	1133,00	569,00	189,25	-0,35	-1,27
<i>Власне дослідження 2005–2023 роки</i>						
923,7	980	1133	569	189,72	-0,48	-1,21

У табл. 1 наведено статистичний аналіз викидів CO₂ у глобальному алюмінієвому секторі за 2005–2023 роки. Діапазон викидів варіюється від 569,00 до 1133,00 млн тонн із помірною мінливістю (стандартне відхилення = 189,72). Як результат, спостерігається незначна лівостороння асиметрія (-0,48) та плоский розподіл (-1,21). Порівняння з дослідженням Hasanov та співавторів (2005–2022) показує:

–середній рівень викидів (913,00 млн тонн) близький до результатів власного дослідження (923,70 млн тонн), що свідчить про стабільність але з тенденцією до зростання;

–медіанний показник у власному дослідженні (980,00 млн тон) трохи вищий, що може вказувати на незначне зростання або зміщення структури даних;

–максимальне значення (1133,00 млн тон) у власному дослідженні перевищує дані Hasanov (1130,00 млн тон), що є ознакою більш точних даних за 2020 рік.

Методи перевірки наявності одиничного кореня є статистичними підходами, що використовуються для визначення стаціонарності часових рядів. Стаціонарний часовий ряд характеризується постійними параметрами, такими як середнє, дисперсія та автокореляція, які залишаються незмінними у часі. Тест на одиничний корінь, розроблений Dickey та Fuller, дозволяє визначити наявність одиничного кореня, що вказує на нестаціонарність часових рядів [9]. Аналогічний тест Phillips-Perron враховує серійну кореляцію та гетероскедастичність для більш точної оцінки [10].

Модель авторегресивного інтегрованого ковзного середнього (ARIMA) є одним із найбільш поширених підходів для прогнозування часових рядів. Ця модель була розроблена завдяки роботам Box і Jenkins у 1970, які включили методи диференціювання в межі моделі ARMA, дозволяючи обробляти нестаціонарні часові ряди [1]. Модель ARIMA визначається трьома параметрами (p, d, q), де:

p – кількість авторегресивних членів, що враховують попередні значення; d – ступінь диференціювання, необхідний для досягнення стаціонарності; q – кількість членів ковзного середнього, що враховують минулі помилки прогнозу.

Часові ряди, такі як серії викидів CO₂, можуть демонструвати нестаціонарність через довгострокові тренди у викидах парникових газів, обумовлені економічною активністю та технологічними змінами. Використання методів аналізу стаціонарності та моделювання ARIMA дозволяє визначати критичні тренди, що допомагають формулювати стратегії сталого розвитку. Це включає ідентифікацію впливу політик декарбонізації, прогнозування майбутніх показників викидів і розробку інноваційних рішень для скорочення впливу на навколишнє середовище.

У цьому дослідженні розглядаємо використання цієї методології для прогнозування викидів, які сформульовано рівнянням:

$$ALCE_t = a_1 ALCE_t^1 + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де $ALCE_t$ – викиди CO_2 в алюмінієвому секторі за період t ;

$ALCE_t^1$ – викиди CO_2 в алюмінієвому секторі за попередній період;

ε_t – помилка описується як білий шум, який характеризується незалежністю та однаковим розподілом із середнім значенням, що дорівнює нулю. У контексті декарбонізації це означає, що відхилення у часових рядах викидів CO_2 не мають систематичних тенденцій або кореляцій, забезпечуючи нейтральну основу для оцінки ефективності політик та стратегій зі скорочення викидів.

Результати дослідження. Аналіз візуалізації даних, представлених на рис. 1, демонструє негативну тенденцію до зростання викидів CO_2 у виробничих процесах алюмінієвої промисловості за період 2005–2023 років. Основною причиною цього є збільшення споживчого попиту, що сприяє розширенню виробництва первинного алюмінію. Цей висновок підкреслює необхідність впровадження ефективних стратегій декарбонізації у виробництві алюмінію для зниження його впливу на клімат.

Результати перевірки стаціонарності даних за допомогою ADF-тесту свідчать про те, що серія не є стаціонарною, а це є ознакою динамічності процесів і важливості використання моделей ARIMA:

ADF Statistic: -2.0772

p-value: 0.2538

Отримані значення свідчать про необхідність застосування диференціювання для досягнення стаціонарності, що підтверджується графіком усунення трендів і варіативності часового ряду рис. 2.

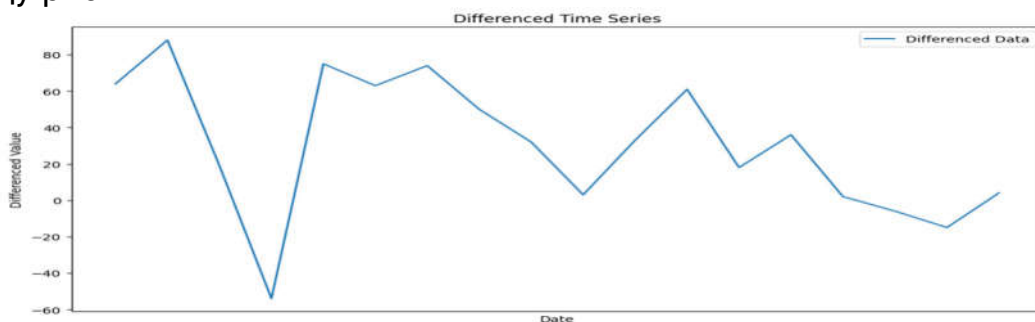


Рис. 2. Графік диференційованого часового ряду

Оскільки ступінь диференціювання d тепер визначений, наступними кроками буде визначення параметрів авторегресії p та змінного середнього q на основі ACF та PACF графіків.

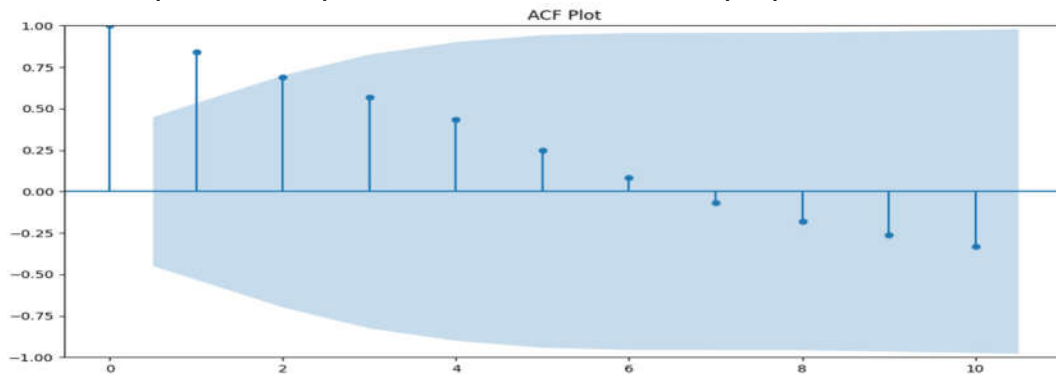


Рис. 3. Графік ACF – автокореляційна функція

Автокореляції у графіку поступово зменшуються, що свідчить про зниження залежності між спостереженнями з часом після диференціювання.

Наявність значимих лагів у межах кількох перших точок вказує на короткострокові залежності в даних. Це підтверджує, що залишкові коливання можуть бути враховані при моделюванні ARIMA через компонент q – змінного середнього.

Часткова автокореляція демонструє значущість лише перших кількох лагів, що вказує на обмежену кількість автокореляційних впливів у диференційованому ряді. Це демонструє невелике значення параметра p для моделі ARIMA. Виявлені короткострокові залежності дозволяють прогнозувати викиди CO_2 , ідентифікувати потенційні пікові моменти та впроваджувати заходи з декарбонізації.

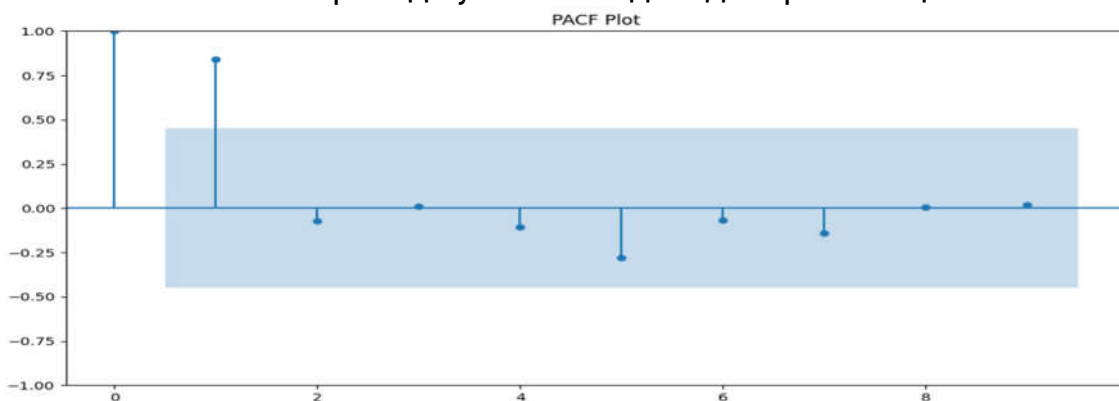


Рис. 4. Графік PACF – часткова автокореляційна функція

Тому для проведення ефективної декарбонізації важливо враховувати миттєві коливання та довгострокові тенденції. На основі ACF і PACF визначено оптимальні параметри моделі: $p=2$, $d=1$, $q=2$.

Таблиця 2

Результати ARIMA

Dep. Variable	Total-Cradle to Gate
Model	ARIMA(2, 1, 2)
No. Observations	19
Log Likelihood – Логарифмічна правдоподібність	-90.792
AIC – Критерій Акаїке	191.583
BIC – Критерій Байєса	196.035
HQIC – Критерій Ханнана-Куїна	192.197

	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ar.L1	0.2186	0.514	0.425	0.671	-0.789	1.227
ar.L2	0.7249	0.416	1.742	0.082	-0.091	1.541
ma.L1	0.2082	105.153	0.002	0.998	-	206.304
					205.887	
ma.L2	-0.7913	83.152	-	0.992	-	162.184
			0.010		163.766	
sigma2	1254.8042	1.31e+05	0.010	0.992	-	2.59e+05
					2.56e+05	

продовження табл. 2

Ljung-Box (L1) (Q)	0.01	Показники якості моделі
Prob(Q)	0.91	підтверджують її придатність
Jarque-Bera (JB)	0.16	для аналізу часових рядів.
Prob(JB)	0.92	Зокрема, тести Ljung-Box та
Heteroskedasticity (H)	0.14	Jarque-Bera вказують на
Prob(H) (two-sided)	0.03	відсутність автокореляції та
Skew	-0.13	нормальний розподіл залишків.
Kurtosis	2.62	

Результати підтверджують ефективність ARIMA як аналітичного інструменту для формування стратегій декарбонізації у виробничих галузях. Її інтеграція в металургійні процеси може сприяти сталому розвитку, зменшуючи енергетичні витрати та викиди CO₂.

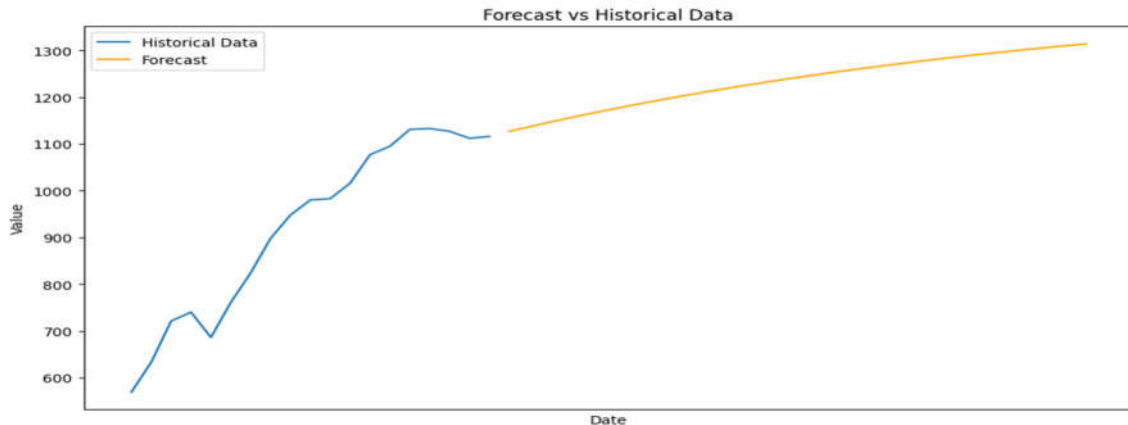


Рис. 5. Візуалізація прогнозу викидів мільйонів тонн CO₂ з період з 2025 по 2050 рр.

Прогноз показує не стрімку тенденцію збільшення викидів CO₂ у 2025–2050 роках, підтверджуючи ефективність моделі ARIMA для оптимізації енергетичних витрат і декарбонізації. Це сприяє переходу до екологічно нейтральних технологій, відповідно до Паризької угоди. Водночас, виробництво первинного алюмінію залишається значним джерелом викидів, що суперечить принципам сталого розвитку.

Історія занепаду алюмінієвої промисловості в Україні підкреслює необхідність її відновлення як складової стратегії сталого розвитку. Зокрема, зупинка роботи ВАТ «ЗАЛК» у 2017 році та руйнування його виробничих потужностей російською компанією RUSAL позбавили Україну статусу виробника первинного алюмінію, перетворивши її на імпортера. Це особливо вражає, враховуючи значний потенціал сталого розвитку, який могла забезпечити електроенергія гідроелектростанцій. Відновлення алюмінієвого виробництва з акцентом на екологічні інновації здатне стимулювати економіку, сприяти створенню робочих місць та посилення декарбонізації. Надання галузі статусу критично важливого виробництва дозволить не лише зміцнити економічний потенціал України, але й відповідатиме глобальним екологічним та соціальним цілям.

Висновки. ARIMA є ефективним інструментом у металургії для прогнозування та управління, забезпечуючи високу точність короткострокових прогнозів і враховуючи сезонність і тренди. Її інтеграція з методами машинного навчання, такими як LSTM або XGBoost, дозволяє підвищити точність і сприяє сталому розвитку, зокрема декарбонізації та раціональному використанню енергії.

Для складних металургійних процесів доцільно використовувати модифікації ARIMA, як-от SARIMA чи ARIMA-X, які враховують сезонні коливання та зовнішні фактори. Україна, маючи ресурси й досвід у металургії, може використовувати ці технології разом із відновлюваною енергією для підвищення екологічної ефективності, зменшення викидів CO₂ і зміцнення економіки. Активна участь у глобальних ініціативах із декарбонізації може зробити Україну ключовим гравцем у досягненні цілей сталого розвитку.

Алюміній – це не просто метал, а символ прогресу, ефективності та сталого розвитку.

1. Hasanov R., Safarov J., & Safarli A. Analyzing and forecasting CO₂ emissions in the aluminum sector using ARIMA model. *AGORA International Journal of Economical Sciences*. 2024. Vol. 18(1). P. 55–64. URL: <http://univagora.ro/jour/index.php/aijes>. (дата звернення: 10.02.2025).
2. Tabereaux A. T., & Peterson R. D. Chapter 2.5 – Aluminum production. *Treatise on Process Metallurgy (Second Edition). Industrial Processes*. 2024. Vol. 3. Pp. 625–676.
3. Zhu S., Gao C., Song K., Chen M., Wu F., & Li X. An assessment of environmental impacts and economic benefits of multiple aluminum production methods. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 370. Article 133523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133523>.
4. Wang Z., Feng Z., Ma Z., & Peng J. A multi-output regression model for energy consumption prediction based on optimized multi-kernel learning: A case study of tin smelting process. *Processes*. 2024. Vol. 12(1), Article 32. <https://doi.org/10.3390/pr12010032>.
5. Peng T., Ou X., Yan X., & Wang G. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 3937–3943. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>.
6. Sen P., Roy M., & Pal P. Application of ARIMA for forecasting energy consumption and GHG emission: A case study of an Indian pig iron manufacturing organization. *Energy*. 2016. Vol. 116(P1). P. 1031–1038.
7. Pan Z., Zhang Z., & Che D. Exploring primary aluminum consumption: New perspectives from hybrid CEEMDAN-S-curve model. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(5). P. 4228. <https://doi.org/10.3390/su15054228>.
8. Peng T., Ren L., Du E., Ou X., & Yan X. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis of primary and recycled aluminum in China. *Processes*. 2022. Vol. 10(11). Article 2299. <https://doi.org/10.3390/pr10112299>.
9. Dickey D. A., & Fuller W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*. 1979. Vol. 74(366a). P. 427–431.
10. Phillips P. C. B., & Perron P. Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*. 1988. Vol. 75(2). P. 335–346.
11. BestAppraiser. (n.d.). Огляд галузі виробництва алюмінію та продукції з алюмінію. URL: <https://bestappraiser.com.ua/oglyad-galuzi-virobnictva-alyuminiyu-ta-produkci%D1%97-z-alyuminiyu-2/>. (дата звернення: 10.02.2025).
12. International Aluminium Institute. (n.d.). URL: <https://international-aluminium.org/>. (дата звернення: 10.02.2025).

REFERENCES:

1. Hasanov R., Safarov J., & Safarli A. Analyzing and forecasting CO₂ emissions in the aluminum sector using ARIMA model. *AGORA International Journal of Economical Sciences*. 2024. Vol. 18(1). P. 55–64. URL: <http://univagora.ro/jour/index.php/aijes>. (data zvernennia: 10.02.2025).
 2. Tabereaux A. T., & Peterson R. D. Chapter 2.5 – Aluminum production. *Treatise on Process Metallurgy (Second Edition). Industrial Processes*. 2024. Vol. 3. Pp. 625–676.
 3. Zhu S., Gao C., Song K., Chen M., Wu F., & Li X. An assessment of environmental impacts and economic benefits of multiple aluminum production methods. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 370. Article 133523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133523>.
 4. Wang Z., Feng Z., Ma Z., & Peng J. A multi-output regression model for energy consumption prediction based on optimized multi-kernel learning: A case study of tin smelting process. *Processes*. 2024. Vol. 12(1), Article 32. <https://doi.org/10.3390/pr12010032>.
 5. Peng T., Ou X., Yan X., & Wang G. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 3937–3943. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>.
 6. Sen P., Roy M., & Pal P. Application of ARIMA for forecasting energy consumption and GHG emission: A case study of an Indian pig iron manufacturing organization. *Energy*. 2016. Vol. 116(P1). P. 1031–1038.
 7. Pan Z., Zhang Z., & Che D. Exploring primary aluminum consumption: New perspectives from hybrid CEEMDAN-S-curve model. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(5). P. 4228. <https://doi.org/10.3390/su15054228>.
 8. Peng T., Ren L., Du E., Ou X., & Yan X. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis of primary and recycled aluminum in China. *Processes*. 2022. Vol. 10(11). Article 2299. <https://doi.org/10.3390/pr10112299>.
 9. Dickey D. A., & Fuller W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*. 1979. Vol. 74(366a). P. 427–431.
 10. Phillips P. C. B., & Perron P. Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*. 1988. Vol. 75(2). P. 335–346.
 11. BestAppraiser. (n.d.). Огляд галузі виробництва алюмінію та продукції з алюмінію. URL: <https://bestappraiser.com.ua/oglyad-galuzi-virobnictva-alyuminiyu-ta-produkci%D1%97-z-alyuminiyu-2/>. (data zvernennia: 10.02.2025).
 12. International Aluminium Institute. (n.d.). URL: <https://international-aluminium.org/>. (data zvernennia: 10.02.2025).
-

Tryhuba V. Y. [1; ORCID ID: 0009-0001-2568-976X],
Post-graduate Student

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

FORECASTING CO₂ EMISSIONS IN THE ALUMINUM SECTOR USING THE ARIMA MODEL: ANALYSIS OF EFFECTIVENESS AND DECARBONIZATION PROSPECTS

The article is devoted to the management of sustainable development of aluminum foundries. In modern industrial conditions, aluminum foundries play a crucial role in various sectors of the economy, including the automotive, aerospace and construction industries. However, the energy-intensive nature of aluminum production, combined with environmental problems, requires the development of sustainable management strategies to ensure long-term production efficiency and environmental responsibility.

The aim of the study is to develop a theoretical and methodological framework for the management of sustainable development of aluminum foundries. The study examines global trends in sustainable development management in the metallurgical industry, identifying key factors affecting the efficiency and sustainability of aluminum casting operations.

The research methodology combines qualitative and quantitative approaches, including statistical analysis. Empirical data from leading aluminum foundries serve as a basis for testing and validating the proposed management strategies.

The article presents a study incorporating the use of the ARIMA model for forecasting CO₂ emissions in the metallurgical sector, particularly in the aluminum industry. The analysis covers time series of emissions from 2005 to 2023, utilizing modern methods for assessing stationarity and modeling. The results confirm the effectiveness of ARIMA in identifying short-term trends, which are crucial for implementing decarbonization strategies. The importance of integrating ARIMA with other methods is emphasized to enhance forecasting accuracy and promote sustainable development. The projected trend of decreasing CO₂ emissions by 2050 aligns with the goals of the Paris Climate Agreement and demonstrates significant potential for the application of «green» technologies in aluminum production, particularly in the context of restoring production in Ukraine.

The results have important scientific and practical implications, as they suggest innovative solutions to improve the sustainability of aluminum foundries. The study contributes to the current discourse on sustainable

industrial development, providing valuable information for business representatives, policymakers and researchers in the field of aluminum production and environmental management.

Keywords: ARIMA model; CO₂ forecasting; decarbonization; aluminum industry; management of sustainable development.

Отримано: 18 березня 2025 року
Прорецензовано: 23 березня 2025 року
Прийнято до друку: 28 березня 2025 року