

УДК 330.342

JEL L73, Q01

DOI 10.32782/2786-765X/2023-3-24

Шапуров О.О.

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри інформаційної економіки,
підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4381-4886>

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

У статті розглянутий комплексний науково-практичний підхід моделювання екологічної складової сталого розвитку, який ґрунтується на системному поєднанні сталого розвитку на регіональному та мікрорівні (суб'єкт підприємства), що дає можливість визначити сценарії екологічного забруднення навколишнього середовища стаціонарними джерелами, розрахувати фінансові втрати окремого суб'єкта металургійного сектора від екодеструктивного впливу та реалізувати можливості екологізації. Проаналізовано екологічну складову сталого розвитку металургійних підприємств за допомогою загальностатистичних методів аналізу рядів динаміки. Більш детально акцентовано увагу на встановленні залежності між капітальними інвестиціями та обсягами викидів шкідливих речовин від стаціонарних джерел за допомогою методу 1 МНК (проста економетрична модель). Обґрунтовано формування регресійного еколого-економічного простору Запорізького регіону ґрунтуючись на: абстрактно логічному аналізі, систематизації та комбінуванні, дедукції, індукції, монографічному та порівняльному методі теоретичному узагальненні, графічному підході. Визначено альтернативні сценарії формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел ґрунтуючись на стандартних та сучасних спеціальних методах: методі ковзаної середньої, експотенційному моделюванні за допомогою підбору трену; моделі Хольта та Брауна (на мові програмування R). Визначили фінансові втрати доходу металургійних підприємств від викидів стаціонарних джерел на прикладі ПрАТ «Дніпроспецсталь». Запропоновано модель прогнозу фінансових втрат на основі методу Random Forest, всі етапи прогнозу реалізовано в прикладній програмі RStudio. Для переробки твердих відходів металургійних підприємств обґрунтували створення прототип заводу Енергія з технологією високошвидкісного низькотемпературного піролізу твердих побутових відходів. Даний промисловий симбіоз зможе повністю вирішити екологічні проблеми міста, тому що в його основі лежать принципово нові технологічні підходи.

Ключові слова: екодеструктивний фактор, економетричний метод, випадкові ліси, фінансові втрати, екологізація, сталий розвиток.

Постановка проблеми. Реалізація принципів сталого розвитку в металургійній галузі в сучасних умовах набуває особливої важливості. Відома своєю високою ресурсомісткістю та значним впливом на навколишнє середовище, ця галузь стикається з низкою викликів, що вимагають системного та інтегрованого підходу до управління. Одним із ключових аспектів є раціональне використання природних ресурсів та енергії, а також зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. Впровадження сучасних технологій, спрямованих на оптимізацію виробничих процесів та підвищення енергоефективності, дозволяє досягти значних економічних та екологічних вигід. Крім того, урахування соціальних аспектів, включаючи створення безпечних та комфортних умов праці, є важливою складовою сталого розвитку в цій галузі. Розвиток інноваційних рішень та впровадження передових методів управління

стає ключовим чинником успіху в досягненні сталості в металургійній галузі, сприяючи підвищенню її конкурентоспроможності та забезпеченню збалансованого економічного, екологічного та соціального розвитку.

Сучасне європейське середовище промислових підприємств направлене на формування сталого розвитку та забезпечення якісного екологічного вектору. Саме тому необхідно проаналізувати вплив капітальних та поточних інвестицій на розвиток екологічної складової; визначити альтернативні сценарії формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел; обґрунтувати регресивний вектор еколого-економічного простору; розрахувати втрати доходу металургійних підприємств від викидів стаціонарних джерел, запропонувати процедуру промислового симбіозу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Металургійна промисловість є ключовою

складовою сучасного промислового суспільства, базою третього та четвертого технологічного укладів. На початкових етапах розвитку капіталізму металургійне виробництво виявилося провідним у технологічному та економічному прогресі. Гірничо-металургійний комплекс став лідером у впровадженні передових технологій, систем виробництва, форм оплати праці, та типів власності.

В більшості наукових дослідженнях вітчизняних вчених: О. Амоші [1], Б. Андрушківа [2], М. Білопольського [3], О. Ляшенко, Т. Мельника та інших, виділені наступні економіко-екологічні та потенціалоутворюючі напрями розвитку металургійного виробництва:

– відновлювальний напрям, направлений на видалення морально та технічно застарілих устаткувань та нерентабельних виробництв, удосконалення технологічних процесів в контексті екологізації, реконструкцію незавершених об'єктів металургійних комплексів, постійне впровадження інноваційних видів металопродукції та зростання виробництва продукції з високою доданою вартістю [1, с. 56];

– напрям конкурентних переваг, що включає в себе зменшення енерго- та матеріаловитрат виробництва, оптимізацію трудових витрат та поліпшення інфраструктури, впровадження досягнень науково-технічного прогресу та агресивну збутову стратегія [2, с. 15];

– напрям глобалізації, який ґрунтується на консолідації та домінування глобальних транснаціональних корпорацій, а також можливе переміщення металургійного виробництва в регіони з більш низькою собівартістю [3, с. 10].

До сьогоднішнього часу екологічний аспект розвитку металургійних підприємств було майже ігноровано. Проте, враховуючи зростаючу важливість стратегічних тенденцій світового металоринку і міжнародних металургійних компаній, екологічна політика підприємств набуває все більшого значення. Національні металургійні компанії, незважаючи на підвищену увагу до питань екологічності виробництва та продукції в останні часи, відстають від своїх основних конкурентів у темпах зниження обсягів викидів забруднюючих речовин. Впровадження інноваційних технологій не враховує відповідального ставлення власників та співробітників до проблем охорони навколишнього середовища.

Мета статті. Метою дослідження є моделювання сталого розвитку металургійних підприємств в умовах деструктивних тенденцій. Дослідження було спрямовано на вирішення наступних завдань: проаналізувати показники

екологічної складової сталого розвитку металургійних підприємств; побудувати динамічну модель залежності капітальних інвестицій від шкідливих викидів стаціонарних джерел; обґрунтувати формування регресійного вектору еколого-економічного простору Запорізького регіону; визначити альтернативні сценарії (песимістичний, реалістичний, оптимістичний) формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел; розрахувати втрати доходу металургійних підприємств від викидів стаціонарних джерел, запропонувати процедуру промислового симбіозу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Серйозним завданням забезпечення сталого розвитку промислових підприємств є протидія росту деструктивних екологічних процесів у економіці. Щорічно стаціонарні джерела забруднення промислових підприємств викидають у атмосферне повітря понад 2 мільярди тонн шкідливих речовин, причому основним забруднювачем є підприємства металургійної галузі. Відсотковий внесок металургійного виробництва у забруднення навколишнього середовища становить 27-34%, і цей показник щороку зростає. Простежити динаміку змін можна виходячи з таблиці 1.

Слід відзначити, що існує сильна взаємозалежність між рівнем капітальних інвестицій та рівнем викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення, про що свідчить побудована функціонально значим однофакторна регресійна модель та сильний взаємозв'язок між факторною та результируючою ознакою (таблиця 2).

Капітальні та поточні витрати на охорону навколишнього середовища постійно зростають, при цьому капітальні інвестиції в металургійних підприємствах збільшилися більш ніж вдвічі, а поточні інвестиції зросли на 24%.

Треба зауважити, що застаріла технологічна база промислового виробництва, яка існувала ще до незалежності країни, значною мірою сприяла забрудненню природного середовища. Токсичні відходи, у залежності від їх складу, представляють значну загрозу для навколишнього середовища та суспільства загалом [4, с. 110]. Різноманітність складу металургійних відходів вимагає вдосконалення ефективних методів їх утилізації, враховуючи різні агрегатні стани (тверді, рідкі, газоподібні) та різнопланові методи їх обробки. Особливу важливість у викидах парникових газів представляють речовини, такі як метан, сірка, діоксин азоту, оксид вуглецю. Поширеність забруднення атмосферного повітря в старопромислових

Таблиця 1

Показники екологічної складової сталого розвитку металургійних підприємств

Національна економіка/металургійне виробництво	2017	2018	2019	2020	2021
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення, тис. т					
Всі галузі національної економіки	2584	2508	2460	2238	2242
в т. ч. металургійне виробництво	721	729	740	730	689
% у загальних викидах	27,90	29,07	30,08	32,62	30,73
Капітальні інвестиції на охорону навколишнього середовища, млн грн					
Всі галузі національної економіки	11025	10074	16256	13240	н/д
в т. ч. металургійне виробництво	2018	2781	3480	4436	н/д
% у загальних капітальних інвестиціях	18,30	27,61	21,41	33,50	н/д
Поточні витрати на охорону навколишнього середовища, млн грн					
Всі галузі національної економіки	20466	24317	27480	28093	н/д
в т. ч. металургійне виробництво	2702	3185	3781	3344	н/д
% у загальних поточних інвестиціях	13,20	13,10	13,76	11,90	н/д

Джерело: [13]

Таблиця 2

Динамічна модель залежності капітальних інвестицій від шкідливих викидів стаціонарних джерел (1МНК)

Показники	Значення	Примітки
Множинний R	0,811	Значний зв'язок між результативною та факторною ознакою
R-квадрат	0,658	Значний зв'язок між результативною та факторною ознакою
У-перетину	22478060	0,00007 < 0,05 параметр значим
X-змінна	-2523,06	0,00245 < 0,05 параметр значим
Значимість F	0,00244	модель адекватна

Джерело: [7]

депресивних регіонах України є найбільш актуальним явищем [5, с. 270].

Запорізький регіон стабільно посідає третє місце серед регіонів країни за рівнем забрудненості від стаціонарних джерел забруднення. Питома вага регіону за рівнем забрудненості в загальних показниках країни становить 5–7%. Найбільш забрудненим містом є Запоріжжя (питома вага забруднення – 38–50%). Динаміка обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами (Україна та Запорізький регіон) наведена в таблиці 3.

Після аналітичної діагностики обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами за допомогою методу ковзаної середньої,

методу експотенційного згладжування та методу підбору функції отримали наступні прогнозні результати, наведені в таблиці 4 [6].

Базуючись на методі ковзаної середньої, методи експотенційного згладжування отримали лінійно-стагнаційний тренд, який практично не змінюється та обсяги викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами будуть знаходитись на рівні 151,2-155 тис. т. Дещо інша тенденція за поліномом другого порядку, за прогнозами в майбутньому спостерігається спадна тенденція викидів.

Використовуючи множинність даних за період 2001–2021 рр. за допомогою адаптивних моделей Брауна [6, с. 930] та Хольта [7; 8, с. 410] отримали наступні результати.

Таблиця 3

Динаміка обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами (Україна та Запорізький регіон)

Показники	2017	2018	2019	2020	2021
Обсяги викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами Запорізький регіон, тис. т	180,9	174,7	173,4	155,5	148,2
Обсяги викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами (Україна), тис. т	2584,9	2508,3	2459,5	2238,6	2242
% до загальних викидів по Україні	7,00	6,96	7,05	6,95	6,61

Джерело: [13]

Таблиця 4

**Прогнозні результати обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами
(Запорізька область)**

прогноз	Метод ковзаної середньої	Метод експотенційного згладжування	Метод підбору функції (поліном $y=-0,2551x^2+1,1293x+236,57$)
2023	153,8	151,3	127,6
2024	155,7	151,2	116,7
2025	154,6	151,2	105,4
2026	154,7	151,2	93,5
2027	155,0	151,2	81,1

Джерело: [7; 8]

Таблиця 5

**Прогнозні результати обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами
(Запорізька область)**

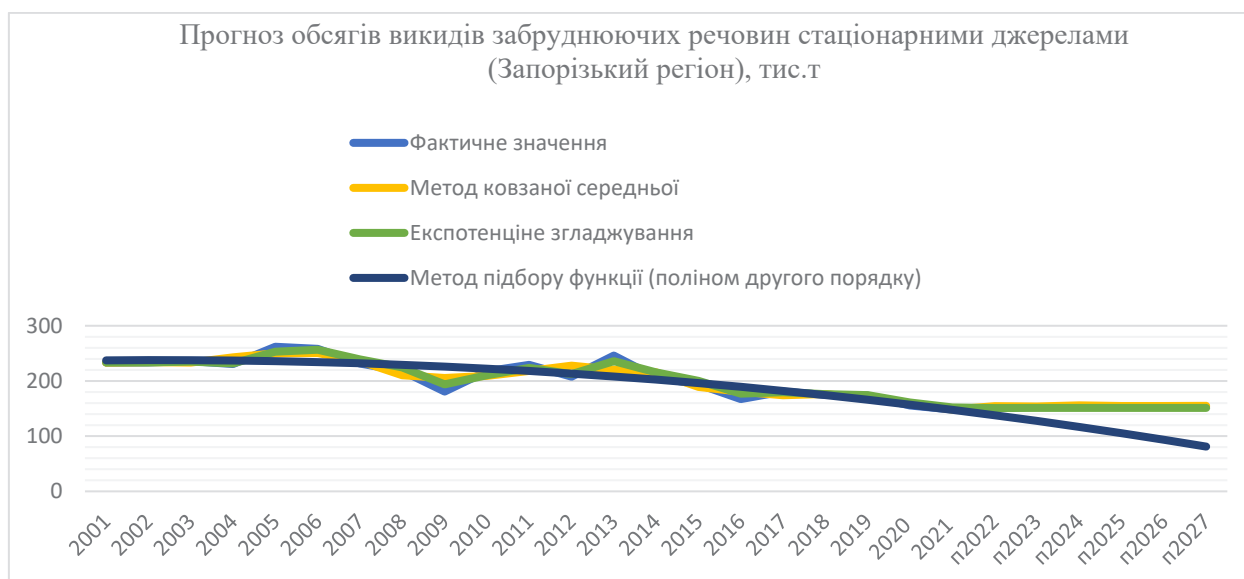
прогноз	Адаптивна модель Брауна (розрахована на основі Microsoft Excel)	Адаптивна модель Хольта (розрахована на основі RStudio)
2023	181,84	135,51
2024	179,00	127,37
2025	176,16	119,23
2026	173,32	111,09
2027	170,48	103,03

Джерело: [6]

Виходячи з адаптивної моделі Брауна та Хольта отримали спадний тренд. Обсяг викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами буде зменшуватись з кожним прогнозним роком з середнім темпом у 2% за моделлю Брауна та 6,7% за моделлю Хольта. Графічне зображення отриманих результатів наведено на рисунку 2.

Грунтуючись на обґрунтованих розрахунках можна передбачити альтернативні сценарії (песимістичний, реалістичний, оптимістичний) формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел в Запорізькому регіоні (таблиця 6).

Таким чином для розрахунку песимістичного прогнозу доцільно використовувати адаптивну модель Брауна; реалістичного – стандартні



**Рис. 1. Прогноз обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами
(Запорізький регіон) на основі стандартних методів аналізу динамічних рядів**

Джерело: [13]

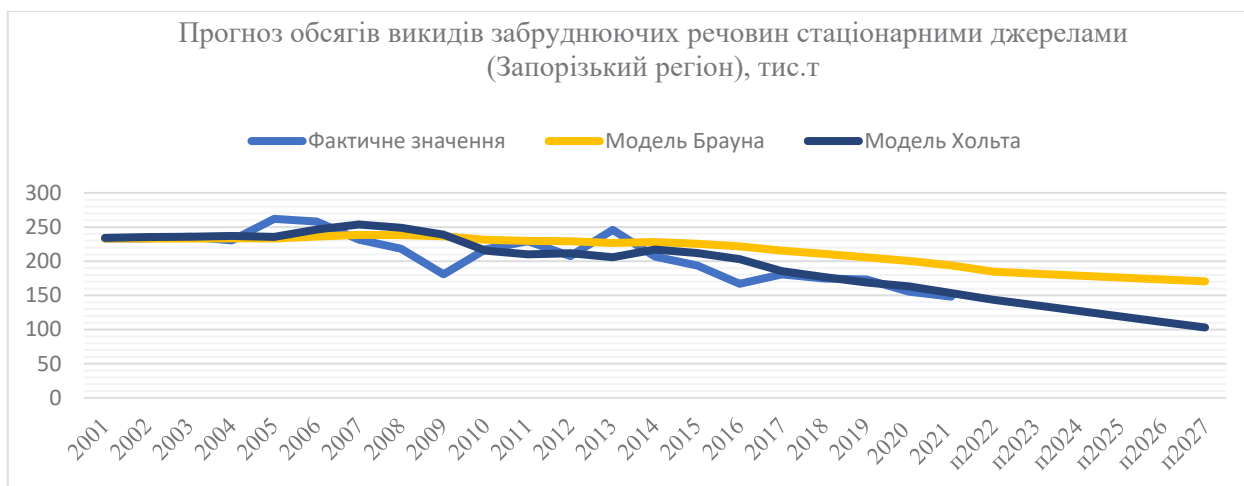


Рис. 2. Прогноз обсягів викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами (Запорізький регіон) на основі адаптивних моделей

Джерело: [13]

методи аналізу рядів динаміки; оптимістичного – поліном другого порядку.

В результаті негативних тенденцій забруднення формується регресивний вектор екологічно-економічного простору. Більш детально дамо визначення поняттю еколого-економічного простору та складовим його регресивного вектору (чинникам та проблемам).

Еколого-економічний простір – це насамперед насичена територія, що вміщує множину об'єктів і зв'язків між ними, а саме: населені пункти; промислові підприємства; інженерні мережі; рекреаційні території; поновлювальні і непоновлювальні, виснажувальні і невиснажувальні, замінні і незамінні, відновлювальні та невідновлювальні природні ресурси.

Доцільно сформувані основні чинники екологічних проблем Запорізького регіону: диспропорції у галузевій структурі промислового виробництва призводять до формування екологічно небезпечних виробничих процесів; стагнаційні економічні процеси без використання інновацій та ресурсозберігаючих технологій

визначають високу питому вагу ресурсоемних та енергоємних суб'єктів промисловості; інтенсивне використання природних ресурсів протягом багатьох років без врахування об'єктивних законів розвитку та відтворення природно-ресурсного потенціалу регіону, що призвело до накопичення дисбалансів в екологічній сфері; високий ступінь техногенного навантаження на область негативно впливає на стан навколишнього природного середовища, призводить до надмірного забруднення поверхневих і підземних вод, повітря і земель, нагромадження у великих кількостях побутових та промислових відходів, у тому числі небезпечних [4, с. 110].

Грунтуючись на проблемних факторах сформуємо нагальні групи екологічних проблем в системі сталого розвитку регіону: стан атмосферного повітря (значні показники щільності викидів від стаціонарних джерел на місцевість (450т/км² на рік, 256т/км² за добу) та на душу населення (94 т/чол. на рік, 256 г/чол. на добу; проблеми водних ресурсів (забруднення водних об'єктів скидами забруднюючих речовин із

Таблиця 6

Альтернативні сценарії формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел в Запорізькому регіоні

Показники	Песимістичний (Модель Брауна)	Реалістичний (метод ковзаної середньої, метод експотенційного згладжування)	Оптимістичний (за поліномом другого порядку)
Обсяги викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами (Запорізький регіон), тис. т	170,48	151-155	81,1

Джерело: [6–8]

зворотними водами промислових підприємств, підприємств житлово- комунального господарства; порушення гідрологічного та гідрохімічного режиму малих рачок області; забруднення підземних водоносних горизонтів; підтоплення територій регіону, проблема шахтних і кар'єрних вод); земельні ресурси, ліса, надра (активізація екзогенних геологічних процесів на узбережжі Азовського моря; збільшення порушених та відпрацьованих земель в регіоні до 2,94 тис. га. (0,1%))

Стагнація економічних процесів регіону, відсутність позитивних змін у структурі галузей економіки, зростання структурного та кваліфікаційного безробіття, депресивні тенденції промислового персоналу та скорочення фінансування розвитку людського капіталу породжує виникнення старопромислового регіону. Саме старопромисловий регіон – депресивний регіон з значною часткою галузей матеріального виробництва, який має проблеми зі сталим розвитком.

Майже 37-45% викидів від загальної кількості забруднюючих речовин регіону припадають на підприємства чорної та кольорової металургії. Технологічні процеси металургійних підприємств регіону в загальних викидах металургії країни становлять 6-8%. Найбільшим металургійним підприємством, забруднювач атмосферного повітря Запорізького регіону є ПАТ «Запоріжсталь». Окрім ПАТ «Запоріжсталь», основні металургійні підприємства-забруднювачі: ПАТ «Запорізький завод феросплавів», ПАТ «Запоріжкокс», ПАТ «Дніпроспецсталь», ДП «Запорізький титаномагнієвий комбінат», ПАТ «Запоріжвогнетрив».

Слід зазначити, що якщо підприємство металургійної промисловості забруднює атмосферне повітря, то це забруднення поширюється, розсіюється у довкіллі. У наслідок забруднення атмосферного повітря підприємством хворіє населення міста, лише частина якого – працівники цього підприємства та їх діти, з лікування яких підприємство несе витрати та в наслідок невиходу їх на роботу має зменшення у обсязі виробленої продукції. Ще одна частина населення міста через хворобу може зменшити обсяги закупівлі продукції підприємства чи в інший спосіб опосередковано зменшити ефективність діяльності підприємства.

Базуючись на системі розрахункових даних промислового підприємства ПрАТ «Дніпроспецсталь» визначено фінансові втрати від екологічного фактору. З метою подальшої порівняльності даних фінансових втрат для розрахунку використовувались дані металургійної

галузі Запорізької області: середня кількість годин тимчасової непрацездатності на 1 штатного працівника (металургійна галузь Запорізької області); фонд робочого часу в середньому на 1 штатного працівника (металургійна галузь Запорізької області); середньомісячна заробітна плата робітника металургійної галузі Запорізької області.

Обґрунтовуючи зроблені розрахунки можна виділити наступні закономірності:

1) Загальні викиди забруднених речовин прямо пропорційно впливають на непрацездатність штатних працівників. Чим менша кількість викидів, тим менша кількість годин непрацездатності. На ПрАТ «Дніпроспецсталь» зменшення загальних викидів на 17-20% призводить до зменшення непрацездатності на 4,3 години одного штатного працівника.

2) Збільшення вартості 1 години непрацездатності призводить до того, що металургійні підприємства отримують мільйони фінансові втрати. Розрахована виходячи з середньомісячної заробітної плати година непрацездатності збільшилась з 35,93 грн до 93,98 грн (за період 2016–2021 рр.). Фінансові втрати від годин непрацездатності за 2021 р. ПрАТ «Дніпроспецсталь» – майже 29 млн грн.

3) Фінансові втрати металургійні підприємства отримують не тільки у вигляді виплат штатним працівникам, але і у вигляді неповних виробничих потужностей. Фінансові втрати в результаті даного фактору у 2021 р. на ПрАТ «Дніпроспецсталь» склали 226 млн грн.

4) Загальна втрата ПрАТ «Дніпроспецсталь» доходу в результаті впливу деструктивних чинників складає 3-3,5% доходу від реалізації (таблиця 7)

Відповідно до розрахунків пропонуємо створити модель прогнозування загальних фінансових втрат від загальних викидів шкідливих речовин на основі методу випадкових лісів (RandomForest) [9, с. 10], вихідні дані наведені в таблиці 8.

Алгоритм розрахунку прогнозних фінансових втрат ПрАТ «Дніпроспецсталь» від загальних викидів забруднених речовин за допомогою Random Forest у програмі RSstudio наведено в таблиці 9.

Залізовмісними відходами виробництва сталі є шлами та шлаки, які мають назву залежно від способу виробництва сталі (мартенівські, конверторні, електросталеплавильні) [10, с. 120]. Наприклад, питомий вихід шламу на підприємствах України становить 60–80 кг/т сталі, у Європі цей показник – 30 кг/т. Мартенівські шлами є найбільш високодисперсними серед металургійних

Таблиця 7

Загальні фінансові втрати ПрАТ «Дніпроспецсталь»

роки	Розрахована загальна вартість фінансових втрат в результаті непрацездатності працівників, тис. грн	Розрахована загальна вартість фінансових втрат в результаті недовиробництва, тис. грн	Загальні фінансові втрати, млн грн	% до доходів металургійного підприємства
2016 р.	16,005	136,246	152,251	3,68
2017 р.	16,389	109,127	125,517	3,45
2018 р.	20,422	109,302	129,724	3,34
2019 р.	22,902	183,541	206,443	3,01
2020 р.	21,236	156,988	178,225	2,83
2021 р.	28,636	226,119	254,755	3,12

Джерело: [5]

Таблиця 8

Вихідні дані для прогнозної моделі фінансових втрат ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Показники	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.	2020 р.	2021 р.
Загальні викиди забруднених речовин ПрАТ «Дніпроспецсталь», т	1511	1100	682	641	721	752
Фінансові втрати ПрАТ «Дніпроспецсталь», млн грн	152,25	125,52	129,72	206,44	178,22	254,75

Джерело: [9]

Таблиця 9

Алгоритм розрахунку прогнозних фінансових втрат ПрАТ «Дніпроспецсталь» від загальних викидів забруднених речовин за допомогою Random Forest у програмі RSrudio

Етап прогнозу Random Forest у програмі RSrudio	Операція RSrudio
# Встановлення та завантаження бібліотеки randomForest	install.packages("randomForest") library(randomForest)
# Підготовка даних	total_emissions <- c(1511, 1100, 682, 641, 721, 752) financial_losses <- c(152.25, 125.52, 129.72, 206.44, 178.22, 254.75)
# Створення датафрейму	data <- data.frame(total_emissions, financial_losses)
# Розділення даних на тренувальний та тестовий набори (якщо потрібно). В цьому прикладі, для простоти, ми не розглядаємо розділення даних. # Побудова моделі Random Forest	rf_model <- randomForest(financial_losses ~ total_emissions, data=data, ntree=100)
# Прогноз фінансових втрат для нових даних	new_data <- data.frame(total_emissions=c(800, 900, 1000))
# Припустимо нові викиди	predicted_losses <- predict(rf_model, newdata=new_data)
# Виведення прогнозованих фінансових втрат	print(predicted_losses) 1 2 3 166.0193 178.1739 190.3286

Джерело: [9]

шламів, що значно ускладнює процеси підготовки їх до утилізації. Масова частка заліза в них – 47–58%. Масова частка заліза в конверторних шламах нижча, ніж у мартенівських і становить 41–45%. На металургійних підприємствах України накопичено 240 млн т шлаків, 128 млн т з яких є сталеплавильні. Зазвичай доменні шлаки складаються у відвалах відокремлено від сталеплавильних. Масова частка заліза в них – 5% у вигляді корольків [11, с. 131].

Для переробки твердих відходів пропонуємо створити прототип заводу. Енергія з технологією високошвидкісного низькотемпературного піролізу твердих побутових відходів зможе повністю вирішити екологічні проблеми міста, тому що в її основі лежать принципово нові технологічні підходи [12, с. 69]. Сутність їх у тому, що процес рециклінгу ТПВ проходить за модульною схемою, де попередньо відсортований та подрібнений матеріал просушують (без втрати вологи,

яка очищується, збирається та використовується в роботі заводу), а потім за допомогою процесу окислення чи піролізу отримують корисні продукти – висококалорійний піролізний газ та цінний вуглеподібний залишок [12, с. 69].

Останній є сировиною для виробництва добрив та використовується в будівельній галузі. Піролізний газ можна використовувати для отримання теплової енергії як для власного споживання, так і для продажу. При цьому завдяки окисленню та камері мідної каталізації газоочищення всі шкідливі речовини виділяються в твердий залишок, а їх викиди, включаючи діоксини, практично рівні нулю [12, с. 70]. Техніко-економічна оцінка проєкту теплоудару передбачає його окупність за 2,5 роки з моменту пуску підприємства, а вартість проєкту – 6 млн євро. Результатом його впровадження має стати отриманий ефект: поліпшення санітарного стану міста, покращення екологічної обстановки, значне (більше ніж у 10 разів) зниження витрат на поховання відходів і ліквідацію екологічних наслідків зберігання відходів, значне (більше ніж у 10 разів) уповільнення розширення земельних площ, займаних полігонами для поховання відходів, отримання корисних продуктів (піролізного горючого газу, гарячої води й вуглеподібного залишку) і, як наслідок, збільшення потоку прибутку, одержуваного від реалізації цих продуктів.

Висновки. Проаналізовано екологічну складову сталого розвитку металургійних підприємств та акцентовано увагу на щільний взаємозв'язок капітальних інвестицій та обсягів

викидів шкідливих речовин від стаціонарних джерел. Визначено альтернативні сценарії формування шкідливих викидів від стаціонарних джерел ґрунтуючись на стандартних та сучасних спеціальних методах: методі ковзаної середньої, експотенційному моделюванні за допомогою підбору трену; моделі Хольта та Брауна (на мові програмування R). Оцінено загальні фінансові втрати ПрАТ «Дніпроспецсталь» в результаті впливу деструктивних чинників, які по розрахункам складають 3–3,5% доходу від реалізації, а це більше ніж 255 млн.грн. Запропоновано модель прогнозу фінансових втрат на основі методу Random Forest, всі етапи прогнозу реалізовано в прикладній програмі RStudio. Для переробки твердих відходів металургійних підприємств запропоновано створити прототип заводу Енергія з технологією високошвидкісного низькотемпературного піролізу твердих побутових відходів. Даний промисловий симбіоз зможе повністю вирішити екологічні проблеми міста, тому що в його основі лежать принципово нові технологічні підходи.

Таким чином визначено науково-практичний підхід моделювання екологічної складової сталого розвитку, який ґрунтується на системному поєднанні сталого розвитку з урахуванням регіонального мікрорівня (суб'єкт підприємства), що дає можливість визначити сценарії екологічного забруднення навколишнього середовища стаціонарними джерелами, розрахувати фінансові втрати окремого суб'єкта металургійного сектора від екодеструктивного впливу та реалізувати можливості екологізації

Бібліографічний список

1. Амоша О. Пріоритети розвитку депресивних регіонів. *Наукові праці НДФІ*. 2012. № 3 (60). С. 50–56.
2. Андрушків Б. М. Інноваційні засоби формування концепції оцінювання сталого розвитку у системі: підприємство – галузь – регіон – держава (євроінтеграційні аспекти). *Український журнал прикладної економіки*. 2016. Т. 1. № 2. С. 6–17.
3. Білопольський М. Г., Турченко Д. К., Харченко В. А. Оцінка розвитку промислового виробництва. *Вісник економічної науки України*. 2014. № 2. С. 9–12.
4. Шапуров О. О. Стан інновацій та ефективні механізми розвитку металургійних підприємств. *Вісник Одеського національного університету. Серія : «Економіка»*. 2018. Т. 23. Вип. 5 (70). С. 108–113.
5. Шапуров О. О. Складові механізми забезпечення інноваційного сталого розвитку промислових підприємств. *Причорноморські економічні студії*. 2020. Вип. 54. С. 261–272.
6. Guleryuz D. Forecasting outbreak of COVID-19 in Turkey; Comparison of Box–Jenkins, Brown's exponential smoothing and long short-term memory models. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 149. P. 927–935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.032> (дата звернення: 08.11.2023).
7. Automatic robust estimation for exponential smoothing: Perspectives from statistics and machine learning / D. Barrow et al. *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 160. P. 113637.
8. Hyndman Rob J, Akram Md, Archibald Blyth C. «The Admissible Parameter Space for Exponential Smoothing Models». *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. 2008. Vol. 60 (2). P. 407–426.
9. Breiman, Leo. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45 (1). P. 5–32.
10. Копач П. І. Аналіз процесів відходоутворення на виробництвах гірничо-металургійного регіону. *Екологія і природокористування*. 2012. № 15. С. 118–132.
11. Рудь І. Д., Савюк І. В., Самчук Л. М. Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль : ТНТУ, 2015. Т. 79. № 3. С. 130–136.

12. Довга Т. М. Впровадження сучасних технологій рециклінгу твердих побутових відходів. *Економіка та держава*. 2011. № 8. С. 68–71.
13. Статистичний збірник «Довкілля України» URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publnav_ser_u.htm (дата звернення: 08.11.2023).

References

1. Amosha O. (2012) Priorytety rozvytku depresyvnnykh rehioniv [Development priorities of depressed regions]. *Scientific works of NDFI*, no. 3(60), pp. 50–56. (in Ukrainian)
2. Andrushkiv B. M. (2016) Innovatsiini zasoby formuvannia kontseptsii otsiniuvannia staloho rozvytku u systemi: pidpriemstvo – haluz – rehion – derzhava (ievrointehratsiini aspekty) [Innovative means of forming the concept of sustainable development assessment in the system: enterprise – industry – region – state (European integration aspects)]. *Ukrainian Journal of Applied Economics*, vol. 1, no. 2, pp. 6–17. (in Ukrainian)
3. Bilopolskyi M. G., Turchenko D. K., Kharchenko V. A. (2014) Otsinka rozvytku promyslovoho vyrobnytstva [Evaluation of the development of industrial production]. *Herald of economic science of Ukraine*, vol. 2, pp. 9–12. (in Ukrainian)
4. Shapurov O.O. (2018) Stan innovatsii ta efektyvni mekhanizmy rozvytku metalurhiinykh pidpriemstv [State of innovation and effective mechanisms of development of metallurgical enterprises]. *Bulletin of Odessa National University. Series: "Economics"*, tom 23, vol. 5(70), pp. 108–113. (in Ukrainian)
5. Shapurov O.O. (2018) Skladovi mekhanizmu zabezpechennia innovatsiinoho staloho rozvytku promyslovykh pidpriemstv [Components of the mechanism of ensuring of innovative sustainable development of industrial enterprises]. *Black Sea Economic Studies*, vol. 54, pp. 261–272. (in Ukrainian)
6. Guleryuz, D. (2021) Forecasting outbreak of COVID-19 in Turkey; Comparison of Box–Jenkins, Brown's exponential smoothing and long short-term memory models. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 149, pp. 927–935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.032>
7. Barrow, D., Kourentzes, N., Sandberg, R., & Niklewski, J. (2020) Automatic robust estimation for exponential smoothing: Perspectives from statistics and machine learning. *Expert Systems with Applications*, vol. 160, pp. 113637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113637>
8. Hyndman Rob J., Akram Md., Archibald Blyth C. (2008) "The Admissible Parameter Space for Exponential Smoothing Models". *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. 60 (2), pp. 407–426.
9. Breiman, Leo (2001) Random Forests. *Machine Learning*, vol. 45 (1), pp. 5–32.
10. Kopach, P. I. (2012) Analiz protsesiv vidkhodoutvorennia na vyrobnytstvakh hirnycho-metalurhiinoho rehionu [Analysis of waste generation processes at industries of the mining and metallurgical region]. *Ecology and nature management*, no. 15, pp. 118–132. (in Ukrainian)
11. Rud I.D., Savyuk I.V., Samchuk L.M. (2015) Analiz kilkosti utvorenykh vidkhodiv mashynobuduvannia ta metalurhii na terytorii Ukrainy [Analysis of the amount of machine-building and metallurgy waste generated on the territory of Ukraine]. *Bulletin of TNTU*, vol. 79, no. 3, pp. 130–136. (in Ukrainian)
12. Dovga T.M. (2011) Vprovadzhennia suchasnykh tekhnolohii retsyklinhu tverdyykh pobutovykh vidkhodiv [Implementation of modern technologies of solid household waste recycling]. *Economy and the state*, vol. 8, pp. 68–71. (in Ukrainian)
13. Statystychnyi zbirnyk "Dovkillia Ukrainy" [Statistical collection "Environment of Ukraine"]. Available at: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publnav_ser_u.htm (accessed 08 November 2023).

Стаття надійшла до редакції 13.11.2023

Olexandr Shapurov

Doctor of Economic Sciences, Professor,
Professor of Information Economics, Entrepreneurship and Finance Department,
Engineering Educational and Scientific Institute named by Yuriy Potebnya
of Zaporizhzhia National University
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4381-4886>

SUSTAINABLE DEVELOPMENT MODELING METALLURGICAL ENTERPRISES

The **purpose** of the article is to form a complex scientific and practical approach to modeling the ecological component of sustainable development. **Methods.** The article is based on general scientific and special methods of cognition. In the course of the research, general statistical methods of analysis of time series, 1 MPC method (simple econometric model), abstract logical analysis, systematization and combination method, deduction, induction, monographic and comparative method, method of theoretical generalization, graphical approach, moving average method, exponential modeling method; Holt and Brown models, Random Forest method. **Results.** The environmental component of the sustainable development of metallurgical enterprises was analyzed using general statistical methods of dynamic series analysis. In more detail, attention is focused on establishing the dependence between capital investments and the volume of emissions of harmful substances from stationary sources using method 1 of MNK (simple econometric model). The formation of the regression ecological and economic space of the Zaporizhzhya region is substantiated based on: abstract logical analysis, systematization and combination, deduction, induction, monographic and comparative method, theoretical generalization and graphic approach. Alternative scenarios (pessimistic, realistic, optimistic) of the formation of harmful emissions from stationary sources have been determined based on standard and modern special methods: the moving average method, exponentiation modeling using trend selection; Holt and Brown models (in the R programming language). The volume of emissions of polluting substances by stationary sources in the Zaporizhzhya region will be equal to: pessimistic scenario 170.48 thousand tons; realistic 151-155 thousand tons; optimistic 81.1 thousand tons. The financial loss of income of metallurgical enterprises from emissions of stationary sources was determined using the example of PJSC "Dnipropetsstal". The total financial losses of PJSC "Dnipropetsstal" as a result of the influence of destructive factors amount to 3-3.5% of sales revenue, which is more than 255 million hryvnias. We proposed a model of forecasting financial losses based on the Random Forest method, all stages of the forecast were implemented in the RStudio application program. For the processing of solid waste, metallurgical enterprises proposed to create a prototype of the Energy plant with the technology of high-speed, low-temperature pyrolysis of solid household waste. This industrial symbiosis will be able to completely solve the environmental problems of the city, because it is based on fundamentally new technological approaches. **Scientific novelty.** A comprehensive scientific and practical approach to modeling the environmental component of sustainable development has been formed, which is based on a systemic combination of sustainable development at the regional and micro level (business entity), which makes it possible to determine scenarios of environmental pollution by stationary sources, to calculate the financial losses of an individual entity project of the metallurgical sector from eco-destructive influence and realize the possibilities of greening. **Practical significance.** The conceptual provisions of the study, the analysis and forecasting carried out, and the formed scientific and practical approach to modeling the environmental component of sustainable development can be the basis for developing recommendations on providing reserves for increasing the income of metallurgical enterprises.

Keywords: ecodestructive factor, econometric method, random forests, financial losses, greening, sustainable development.