

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ПОТАРЖЕВСЬКИЙ ЄВГЕНІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 504.3.054(477.42)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ОЦІНКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ
ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ
М.ЖИТОМИРА ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ**

101 «Екологія»

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Науковий керівник:
Герасимчук Людмила Олександрівна
доцент, к.с.-г.н.

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Потаржевський Є. Б. Оцінка та моделювання обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел забруднення. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 101 – екологія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Здійснена оцінка та моделювання обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел забруднення. Встановлено, що починаючи з 2005 р. в атмосферне повітря міста було викинуто понад чверть сотні тисяч тонн забруднюючих речовин. Відмічене зменшення обсягів викидів у 3,3 рази у період з 2005 р. по 2010 р., у 1,1 рази – з 2014 р. по 2015 р. та з 2019 р. А з 2010 р. по 2014 р. та з 2016 р. по 2019 р., навпаки, збільшення їх обсягів у 1,6 та 1,3 рази відповідно. Починаючи з 2006 р., обсяги викидів не перевищували 62,4% рівня 2005 р. Значення обсягів викидів по місту становили від 4,9% (у 2010 р.) до 22,3% (у 2005 р.). У складі викидів у 2020 р. переважали викиди діоксиду азоту – 530 т, що склало 33,3% загального обсягу викидів забруднюючих речовин. Серед побудованих 6 регресійних моделей обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел (лінійна, поліноміальна 2-го та 3-го ступенів, експонентна, логарифмічна та степенева) найвищий сумарний ранг, що враховував величину достовірності апроксимації та значення загальної похибки, отримала поліноміальна модель 3-го ступеню $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, яку було використано для прогнозування. Визначено, що у наступні періоди обсяги викидів від стаціонарних джерел в атмосферне повітря м. Житомир будуть зменшуватися.

Ключові слова: обсяги викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел, регресійні моделі, поліноміальна модель 3-го ступеню, величина достовірності апроксимації, загальна похибка.

SUMMARY

Potarzhevskiy E.B. Assessment and modeling of emissions of pollutants into the atmospheric air of the city of Zhytomyr from stationary sources of pollution. – Manuscript qualification work.

Qualification work for a bachelor's degree in specialty 101 – ecology. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

Assessment and modeling of pollutant emissions in the atmospheric air of Zhytomyr from stationary sources of pollution was carried out. It has been established that since 2005, more than ten thousand tons of pollutants have been released into the city's atmosphere. There was a 3.3-fold decrease in emissions between 2005 and 2010, a 1.1-fold decrease between 2014 and 2015 and 2019, and between 2010 and 2014 and from 2016 to 2019, on the contrary, their volumes increased by 1.6 and 1.3 times, respectively. Since 2006, the volume of emissions did not exceed 62.4% of the level of 2005. The value of the volume of emissions in the city ranged from 4.9% (in 2010) to 22.3% (in 2005). Emissions in 2020 were dominated by emissions of nitrogen dioxide – 530 tons, which accounted for 33.3% of the total volume of pollutant emissions. Among the constructed 6 regression models of pollutant emissions from stationary sources (linear, polynomial of the 2nd and 3rd degrees, exponential, logarithmic and power), the polynomial model 3rd degree $y = -1.9292x^3 + 65.171x^2 - 657.45x + 3293.6$, which was used for forecasting. It was determined that in the following periods, the volumes of emissions from stationary sources into the atmospheric air of the city of Zhytomyr will decrease.

Key words: emissions of pollutant from stationary sources, regression models, polynomial model of the 3rd degree, approximation reliability value, total error.

ЗМІСТ

	<i>Стор.</i>
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ДИНАМІКА ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ	9
1.1. Промислові викиди в атмосферне повітря: Україна та ЄС	9
1.2. Специфіка моделювання забруднення повітря	10
<i>Висновки до розділу 1</i>	12
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	13
2.1. Програма проведення досліджень	13
2.2. Методика проведення досліджень	14
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ	16
3.1. Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення	16
3.2. Регресійні моделі та прогнозування обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир	18
<i>Висновки до розділу 3</i>	24
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	26
ДОДАТКИ	30

ВСТУП

Актуальність теми досліджень. Забруднення повітря давно вже визнано загрозою здоров'ю людини. Промислова революція прискорила кількості викидів та країн, що сприяють цьому, відтак визначальною проблемою стали забруднені міста [5, 8, 9]. Забруднення повітря є основним глобальним фактором ризику для здоров'я населення і створює величезний фінансовий тягар для суспільства. Забруднення повітря за даними ВООЗ становило приблизно 12% усіх смертей у 2019 році. Зараз забруднення повітря посідає четверте місце серед основних факторів ризику глобальних захворювань і смертності, поступаючись лише гіпертонії, палінню та харчовим факторам.

Стаціонарні джерела забруднення спричиняють значні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Підприємства не зацікавлені в модернізації пилогазоочисних споруд та впровадженні серії природозахисних заходів, адже штрафи за забруднення довкілля є мізерними і нараховуються вони лише за результатами перевірок відповідними інспекційними підрозділами. Тому, нехтуючи негативним впливом на довкілля, власники підприємств зацікавлені лише в отриманні прибутку. Як наслідок маємо значні викиди забруднюючих речовин до повітряного басейну.

Щоб представити ту кількість викидів, яку можна очікувати в майбутньому, застосовують метод моделювання та прогнозування. Враховуючи це, оцінка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел та прогнозування майбутніх їх обсягів є досить актуальним.

Мета і задачі досліджень. Мета досліджень стали оцінка та моделювання обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м.Житомир від стаціонарних джерел забруднення.

Відповідно до мети, завдання включали:

- 1) оцінка динаміки викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел за період 2005–2020 рр.;
- 2) побудова регресійних моделей обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел та їх оцінка за величинами достовірності апроксимації та значенням загальної похибки;
- 3) здійснення прогнозу обсягу викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел.

Об’єкт дослідження – обсяги забруднюючих речовин від стаціонарних джерел в атмосферне повітря м. Житомир за період 2005–2020 рр.

Предмет дослідження – регресійні моделі обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел в атмосферне повітря м. Житомир.

Методи дослідження: аналізу, статистичний, графічний, моделювання та прогнозування, узагальнення.

Наукова новизна одержаних результатів: здійснені оцінка, моделювання та прогнозування обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел забруднення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їхнього використанні при прогнозуванні обсягів викидів забруднюючих речовин на певних територіях.

Апробація результатів досліджень:

- 1) XVIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Екологія. Наука. Практика – 2022» (21 травня 2022 р., м. Житомир, Поліський національний університет);
- 2) Міжнародна науково-практична конференція молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки» (11-12 травня 2023 р., м. Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування).

Основні положення, що виносяться на захист:

- починаючи з 2005 р. в атмосферне повітря міста було викинуто понад чверть сотні тисяч тонн забруднюючих речовин; починаючи з 2006 р., обсяги викидів не перевищували 62,4% рівня 2005 р.;
- значення обсягів викидів по місту становили від 4,9% (у 2010 р.) до 22,3% (у 2005 р.), а у їх складі переважали викиди діоксиду азоту;
- серед побудованих 6 регресійних моделей обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел найвищий сумарний ранг, що враховував величину достовірності апроксимації та значення загальної похибки, отримала поліноміальна модель 3-го ступеню $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, яку було використано для прогнозування;
- визначено, що у наступні періоди обсяги викидів від стаціонарних джерел в атмосферне повітря м.Житомир будуть зменшуватися.

РОЗДІЛ 1

ДИНАМІКА ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1. Промислові викиди в атмосферне повітря: Україна та ЄС

Зменшення обсягів викидів в атмосферне повітря є одним з індикаторів ЦСР 11 [18]. Починаючи з 2016 р. обсяги викидів в нашій державі поступово зменшуються. В цілому ж по Україні обсяг викидів у 2021 р. (останні дані) склав 78,5% рівня 2015 р. (рис. 1.1).

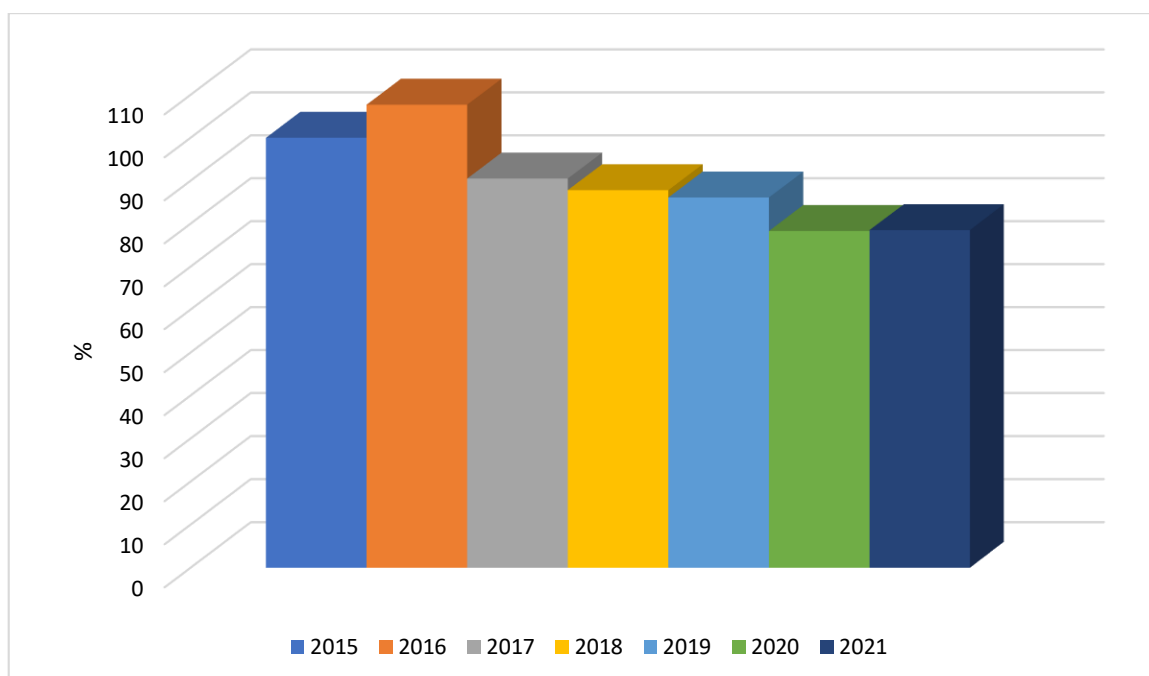


Рис. 1.1. Обсяг викидів стаціонарними джерелами, % до рівня 2015 р. (побудовано на основі даних [8])

Стратегією екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року від 20.10.2021 № 1363-р. визначено зобов'язання до 2030 р. зменшити промислові викиди на 22,5% обсягу викидів 2015 р. [17]. У 2021 р. було досягнуто зменшення викидів на 21,5% від рівня 2015 р.

У країнах ЄС, за даними, оприлюдненими Євростатом [25], незважаючи на промислове зростання, обсяг викидів з 2010 по 2020 рік знизився. В розрізі окремих груп забруднюючих речовин максимальне зменшення – на 53% – зафіксовано для викидів підкислюючих газів (SO_2 , NO_x , NH_3); для таких

речовин, як НЛОС, оксид вуглецю (CO), метан (CH₄) зменшення складо 33%; обсяги викидів парникових газів (CO₂, N₂O, CH₄, HFC, PFC, SF₆, NF₃) знизилися на 28%; частинки розміром менше 2,5 мкм (PM_{2,5}) – на 26% (рис. 1.2).

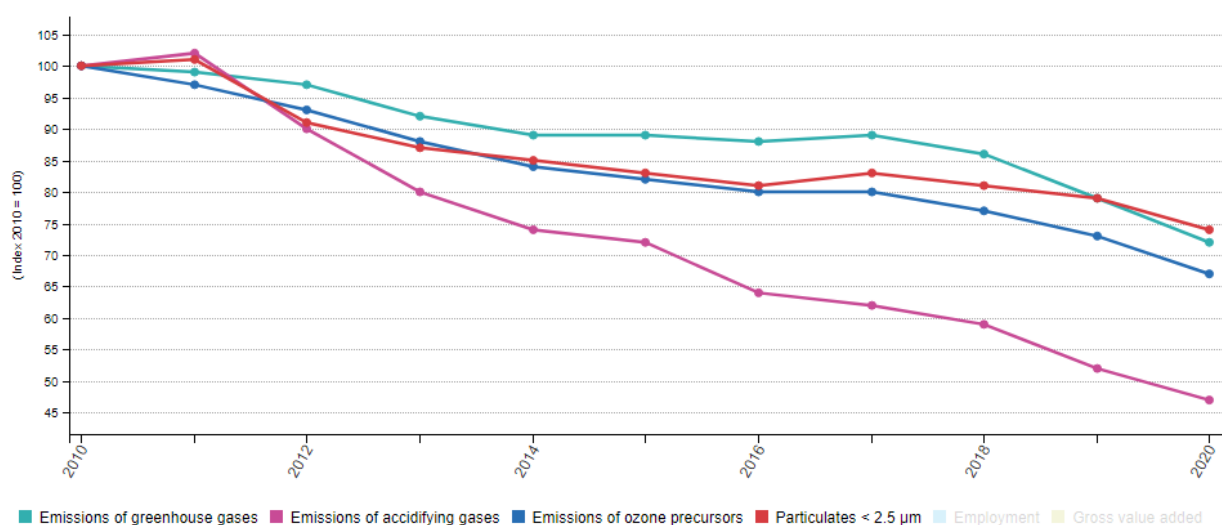


Рис. 1.2. Обсяг викидів в повітря у ЄС, 2010-2020 рр. [25]

1.2. Специфіка моделювання забруднення повітря

Моделювання забруднення повітря розробляється та використовується для кращого розуміння, дослідження, оцінки та регулювання як обсягів викидів, так і якості атмосферного середовища та розподілу токсичних забруднювачів, які містяться у викидах промислових підприємств [2-4, 12, 20]. Атмосферні моделі також використовуються для оцінки впливу забруднювачів повітря на здоров'я людини. У цьому відношенні моделювання забруднення повітря охоплює дуже складну та міждисциплінарну наукову область, де прийняття рішень змішується з методами порівняння між вимірними та змодельованими даними, аналізом та прогнозуванням якості повітря тощо [1, 10, 14, 15].

Аналізовані інформаційні джерела дозволили виділити моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі: моделі розсіювання та моделі забруднення. Основною метою таких моделей є [1-4, 7, 9-15, 19-30]: визначення співвідношень джерело-рецептор та внеску викидів

окремих джерел забруднення; вивчення розподілу концентрації забруднюючих речовин і експонованого населення; оптимізація стратегій щодо нівелювання впливу викидів як від окремих джерел (наприклад, підприємств), так і цілих територій (наприклад, міст, регіонів тощо) і прогноз обсягів викидів та зміни концентрацій забруднюючих речовин. Загальними вимогами до моделювання є наявність актуальної інформації, як метеорологічної і фізико-географічної, так і вичерпних даних щодо обсягів викидів, джерел викидів, кількості населення, що проживає на досліджуваній території (останнє необхідно для оцінки ризику). Наприклад, моделі розсіювання поділяються на гаусові (розподіл концентрацій у двох напрямках – горизонтальному та вертикальному), ейлерові (атмосферна дифузія) та лагранжеві (дослідження концентрації речовин у атмосферному повітрі). До допоміжних моделей забруднення атмосферного повітря також, відносяться: напівемпіричні (опис процесів турбулентної дифузії), стохастичні (вивчення зв'язку між атмосферними параметрами та якістю повітря, прогнозування випадків підвищеного забруднення повітря); рецепторні (оцінюють внесок різних джерел забруднення); Вох-моделі (повітря розглядається у формі коробки і приймається, що повітря всередині неї має однорідну концентрацію); моделі Ханна (оцінка максимальної концентрації забруднюючої речовини від точкового джерела); [13, 23, 24, 26].

Протягом останніх десятиліть моделювання та прогнозування забруднення повітря досягли значного прогресу, викликаючи інтерес різних дослідницьких груп та ініціатив у всьому світі. Багато праць присвячено моделюванню викидів CO₂ в різних країнах: Україні (Ковпак Е.О. та ін., 2017; Кривенко Г.М., 2020), Великій Британії (Demir A.S., 2022), Бангладеші (Rahman A., Hasan M., 2017), Бразилії (Pao H.-T., Tsai C.-M., 2011), Пакистані (Tawiah K. та ін., 2023), США (Bennedsen, M. та ін., 2021), Тайланді (P Kamoljitprapa and S Sookkhee, 2022); викидів діоксиду сірки, діоксиду азоту, оксиду вуглецю та діоксиду вуглецю в Україні (Горошкова Л.А. та ін., 2019), хлору (Біляєв М.М. та ін., 2021), діоксиду сірки (Біляєв М.М. та Русакова Т.І.,

2019), парникових газів (Попов О.О. та ін., 2019; Ястремський О.І. та Кулик В.В., 2020). Використовувалися моделі передбачення Грея (GM) (Рао Н.-Т., Tsai С.-М., 2011), моделі авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA) (Рао Н.-Т., Tsai С.-М., 2011; Rahman A., Hasan M., 2017; Kamoljitprapa P., Sookkhee S., 2022), середньоквадратичну помилку (RMSE), моделі «Times-Україна» (Дячук О.А., 2013), ARIMA, naïve, TBATS, ETS, NNAR і MLP, середню абсолютну помилку (MAE) в якості показників ефективності (Tawiah K. та ін., 2023), статистичні показники відносної та накопиченої частоти (Горошкова Л.А. та ін., 2019). Зазначені праці охоплюють всі аспекти, пов'язані з життєвим циклом забруднюючих речовин, починаючи від їх викидів або утворення в атмосфері і закінчуючи їх впливом на людину та екосистему.

Висновки до розділу 1

1. Зменшення обсягів викидів в атмосферне повітря є одним з індикаторів ЦСР 11. Починаючи з 2016 р. обсяги викидів в нашій державі поступово зменшуються. В цілому ж по Україні обсяг викидів у 2021 р. (останні дані) склав 78,5% рівня 2015 р.

2. Моделювання забруднення повітря розробляється та використовується для кращого розуміння, дослідження, оцінки та регулювання як обсягів викидів, так і якості атмосферного середовища та розподілу токсичних забруднювачів, які містяться у викидах промислових підприємств Протягом останніх десятиліть моделювання та прогнозування забруднення повітря досягли значного прогресу, викликаючи інтерес різних дослідницьких груп та ініціатив у всьому світі.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Програма проведення досліджень

Дослідження щодо оцінки та моделювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел забруднення проводили протягом 2022 – 2023. У програму досліджень увійшли:

- аналіз інформаційних джерел з обраної теми;
- збір статистичних даних щодо обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел за період 2005–2020 рр.;
- оцінка динаміки обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м.Житомир від стаціонарних джерел за 2005–2020 рр.;
- визначення внеску м.Житомир до загального обсягу викидів по області за період 2005–2020 рр.;
- визначення структури викидів забруднюючих речовин у 2020 р.;
- створення моделей обсягів викидів у Excel (побудова точкових діаграм за 16-ма періодами з 6 видами апроксимаційної залежності (лінійна, поліноміальна 2-го та 3-го ступеня, експонентна, логарифмічна та степенева) з відповідними рівняннями та величинами достовірності апроксимації);
- ранжування побудованих моделей за значенням R^2 ;
- розрахунок загальної похибки за допомогою ABS функції та ранжування моделей;
- вибір моделі для здійснення прогнозування;
- графічне представлення даних;
- формулювання висновків.

2.2. Методика проведення досліджень

Інформаційною базою досліджень стали офіційні матеріали Державної служби статистики України [8], а також Головного управління статистики у Житомирській області [6].

Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел оцінювалися в динаміці за період з 2005 по 2020 рр., визначався склад викидів та відсотковий внесок викидів м.Житомир до загального обсягу викидів по області.

Вихідні дані для побудови моделей та здійснення прогнозування обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир від стаціонарних джерел забруднення

Роки	Періоди	Обсяг викидів, т
2005	1	2973
2006	2	1855
2007	3	1782
2008	4	1740
2009	5	1501
2010	6	908
2011	7	1301
2012	8	1384
2013	9	1425
2014	10	1449
2015	11	1281
2016	12	1296
2017	13	1420
2018	14	1538
2019	15	1626
2020	16	1618

Для початку були побудовані точкові діаграми на основі даних, що наведені в табл. 2.1 за допомогою *MS Excel*. На графіках значення років відповідали періодам: 2005 р. – період 1, 2006 р. – період 2, ..., 2020 р. – період 16. На точкових діаграмах були додані 6 видів апроксимаційної залежності

(лінійна, поліноміальна 2-го та 3-го ступеня, експонентна, логарифмічна та степенева) з відповідними рівняннями та поміщені на діаграми величини достовірності апроксимації (рис. 2.1).

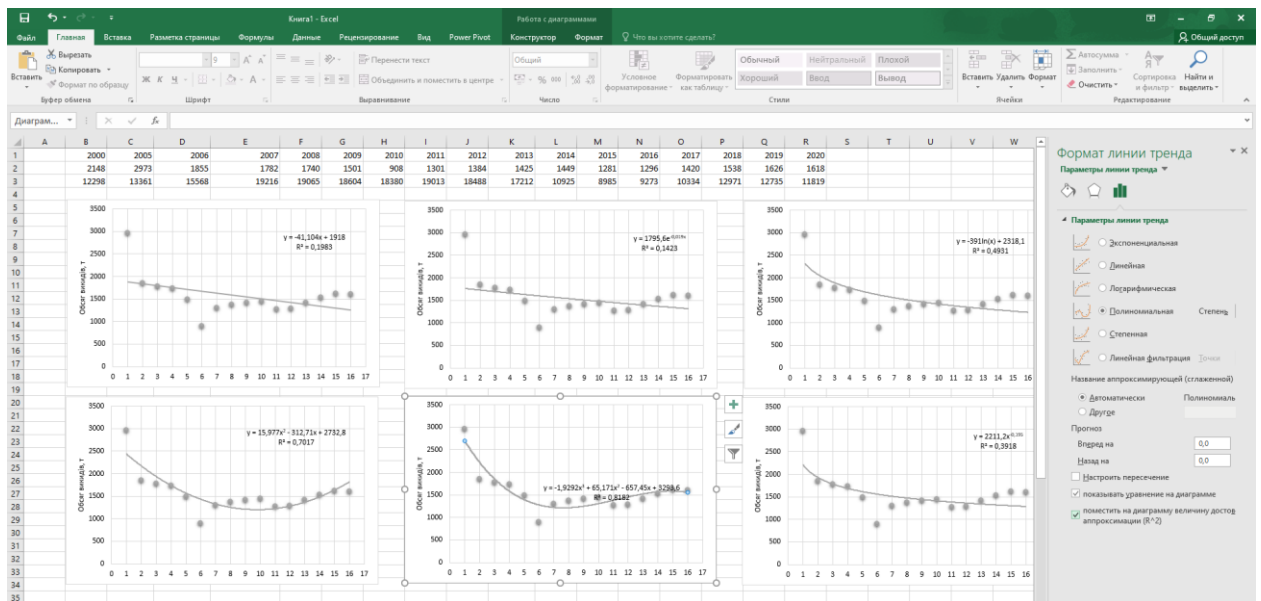


Рис. 2.1. Створення моделей обсягів викидів у Excel

Наступним етапом стало ранжування побудованих моделей за значенням R^2 з присвоєнням відповідних рангів (від 1 до 6, де найбільшому значенню R^2 відповідав перший ранг).

Перевірку достовірності розрахунків за кожною побудованою моделлю здійснювали шляхом порівняння отриманих даних кількості викидів з фактичними. Далі розраховували загальну похибку отриманих математичних моделей за допомогою ABS функції і за її значеннями проводили ранжування моделей (від 1 до 6, де найменшому значенню похибки відповідав перший ранг).

На основі ранжування побудованих моделей за значенням R^2 та загальною похибкою проводимо зведене ранжування (як сума двох попередніх рангів).

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ

3.1. Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення

Якість повітря відіграє важливу роль у довкіллі та нашому здоров'ю (за оцінками ВООЗ, через забруднення повітря щороку помирає близько чверті мільйона людей). Існує багато факторів, що визначають стан повітря, одним з них є викиди забруднюючих речовин стаціонарними джерелами.

Дослідження кількості викидів здійснювалось шляхом порівняння їх обсягів протягом 16 років з 2005 по 2020 роки для м. Житомир.

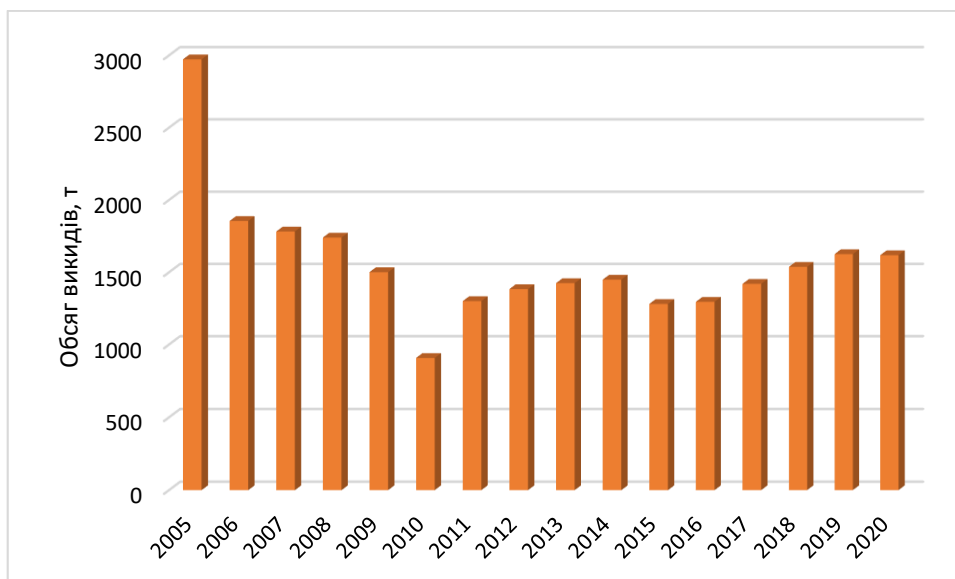


Рис. 3.1. Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м.Житомир від стаціонарних джерел, 2005–2020 рр.

Починаючи з 2005 р. в атмосферне повітря міста було викинуто понад чверть сотні тисяч тонн забруднюючих речовин. Мінімальні кількості викидів за досліджуванний період – 908 т – спостерігалися у 2010 р., максимальні – 2973 т – у 2005 р. Відмічається зменшення обсягів викидів у 3,3 рази у період

з 2005 р. по 2010 р., у 1,1 рази – з 2014 р. по 2015 р. та з 2019 р. А з 2010 р. по 2014 р. та з 2016 р. по 2019 р., навпаки, збільшення їх обсягів у 1,6 та 1,3 рази відповідно (рис. 3.1). Відмітимо, що починаючи з 2006 р., обсяги викидів не перевищували 62,4% рівня 2005 р.

Значення обсягів викидів по місту становили від 4,9% (у 2010 р.) до 22,3% (у 2005 р.) загального обсягу викидів по області (рис. 3.2).

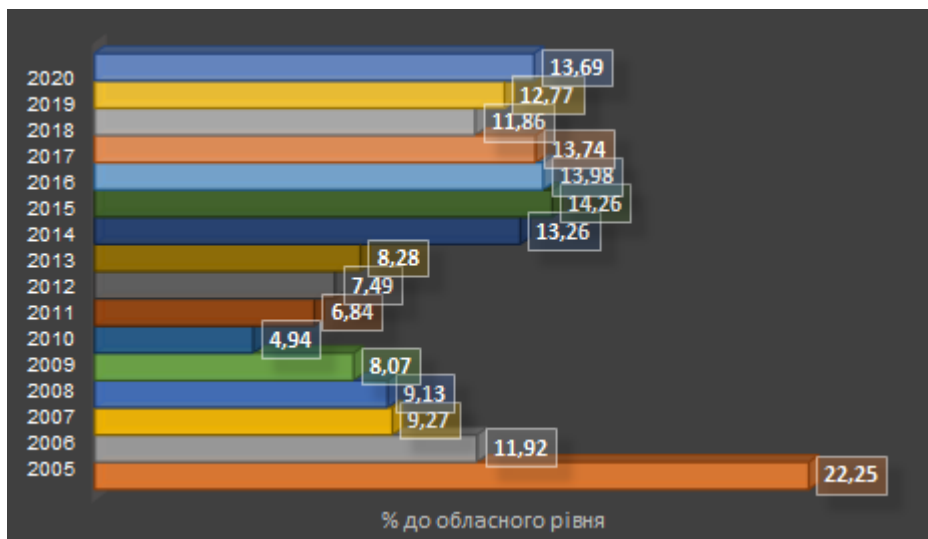


Рис. 3.2. Внесок м.Житомир до обсягу викидів по області, 2005–2020 рр.

У складі викидів у 2020 р. переважали викиди діоксиду азоту – 530 т, що склало 33,3% загального обсягу викидів забруднюючих речовин (рис. 3.3).

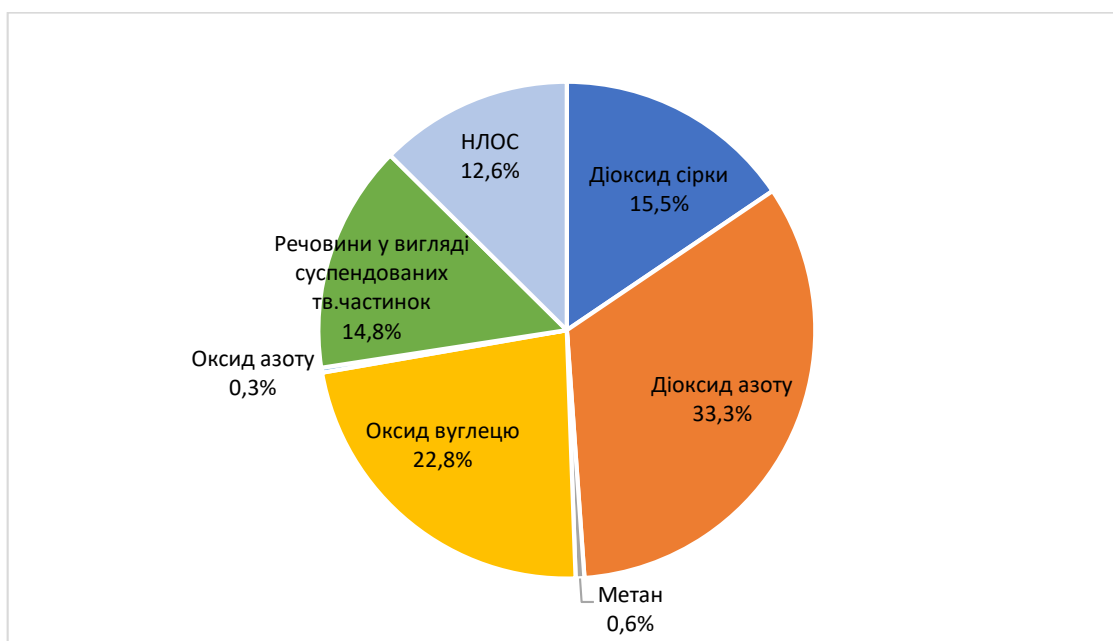


Рис. 3.3. Склад викидів забруднюючих речовин, 2020 р.

Викиди діоксиду сірки склали 33,7%, діоксиду азоту – 36,7%, метану – 0,3%, оксиду вуглецю – 17,4%, оксиду азоту – 20,8%, суспендованих твердих частинок – 7,2%, НЛОС – 41,9% загального обсягу викидів по області (рис. 3.4).

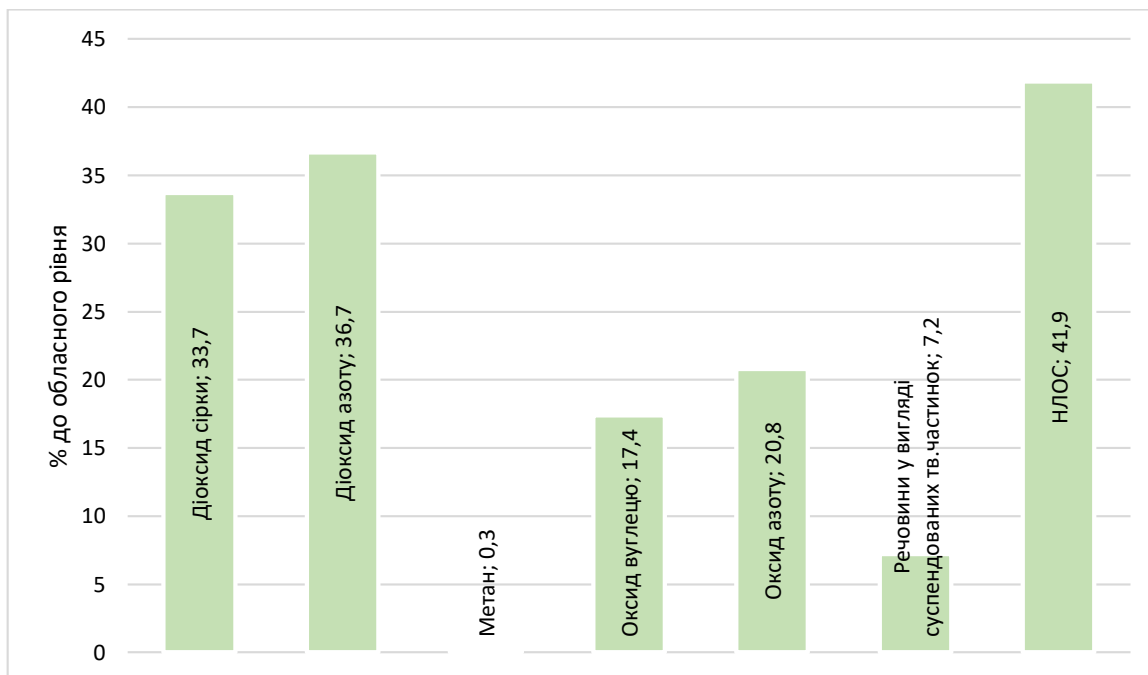
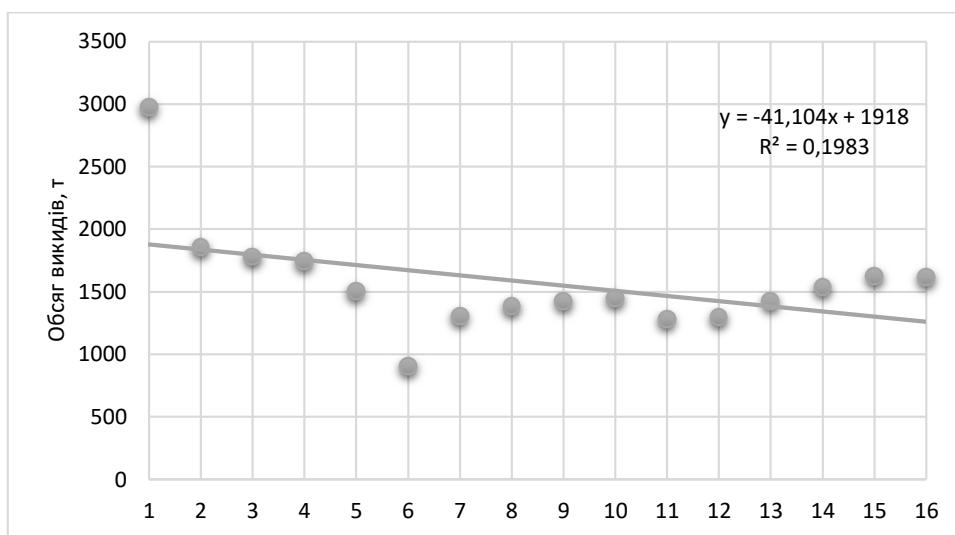


Рис. 3.4. Обсяги викидів окремих забруднюючих речовин у відсотках до обласного рівня, 2020 р.

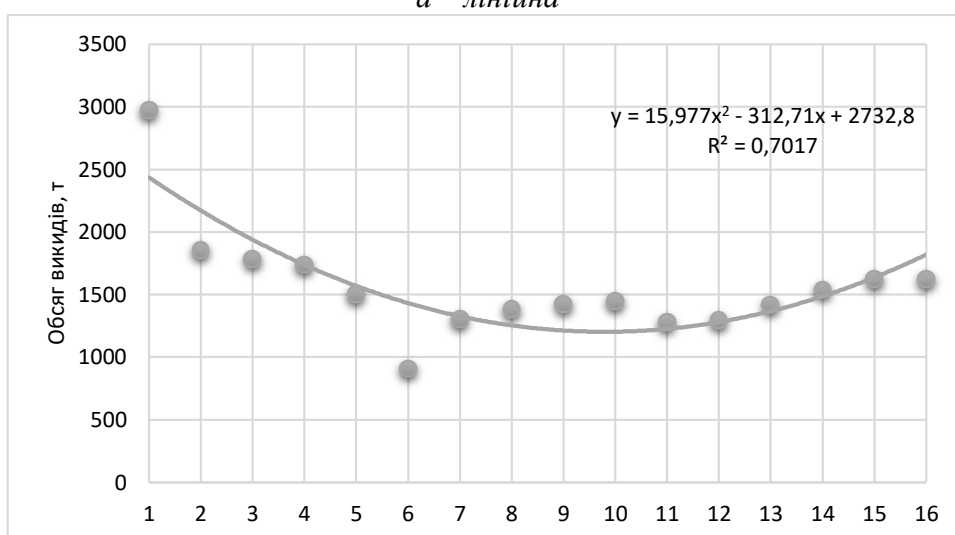
Крім зазначених викидів до атмосферного повітря м.Житомир надійшло 232665 т викидів діоксиду вуглецю, що склало 32,3% обласного рівня.

3.2. Регресійні моделі та прогнозування обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря м. Житомир

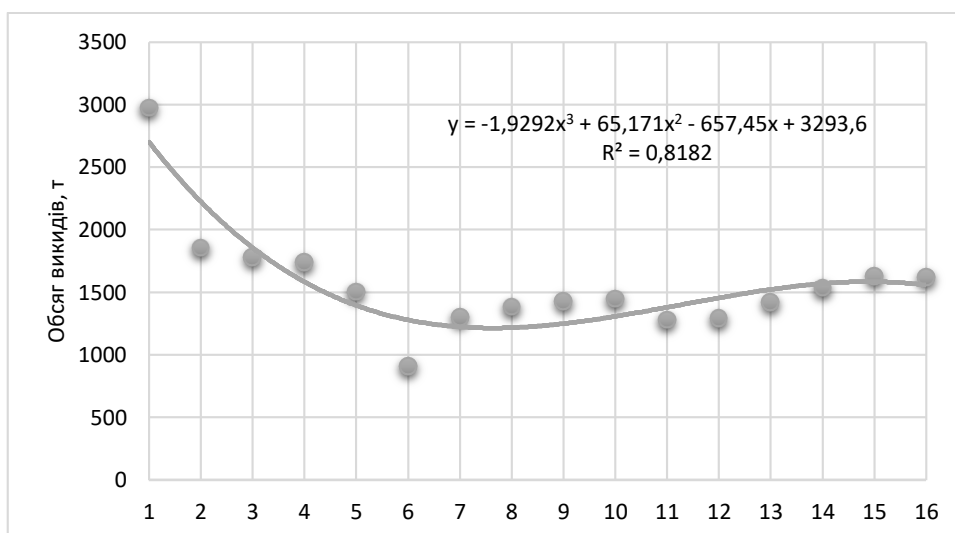
Побудовані точкові діаграми, на які були додані 6 видів апроксимаційної залежності (лінійна, поліноміальна 2-го та 3-го ступеня, експонентна, логарифмічна та степенева) з відповідними рівняннями та поміщеними на діаграмах величинами достовірності апроксимації представлені на рис. 3.5.



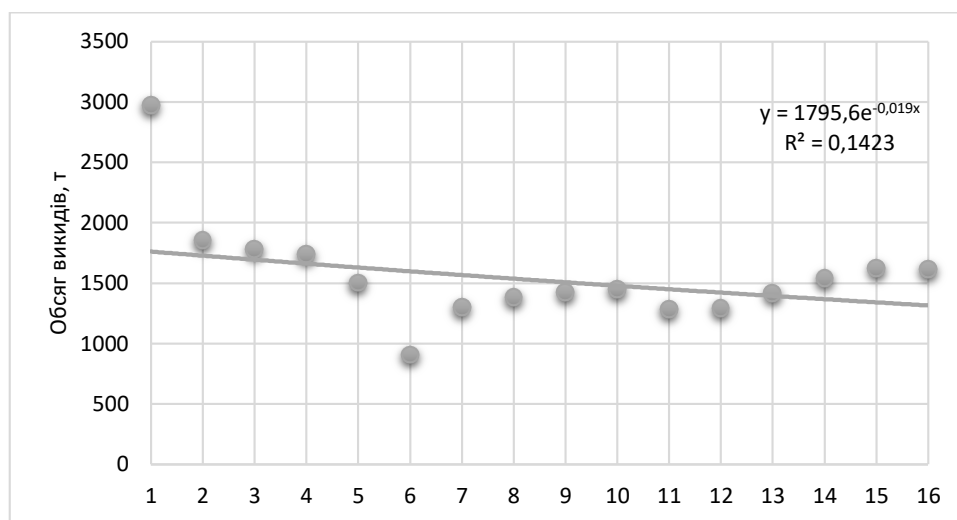
а – лінійна



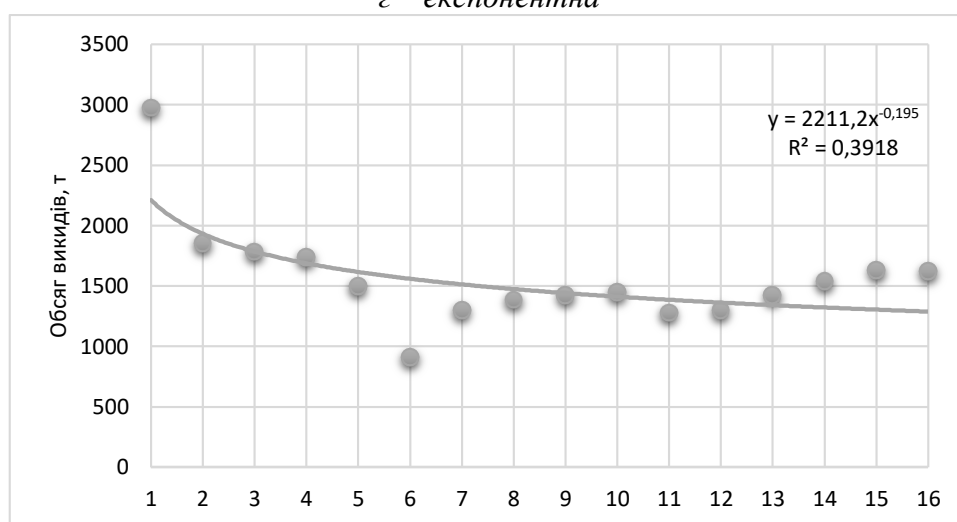
б – поліноміальна 2-го ступеня



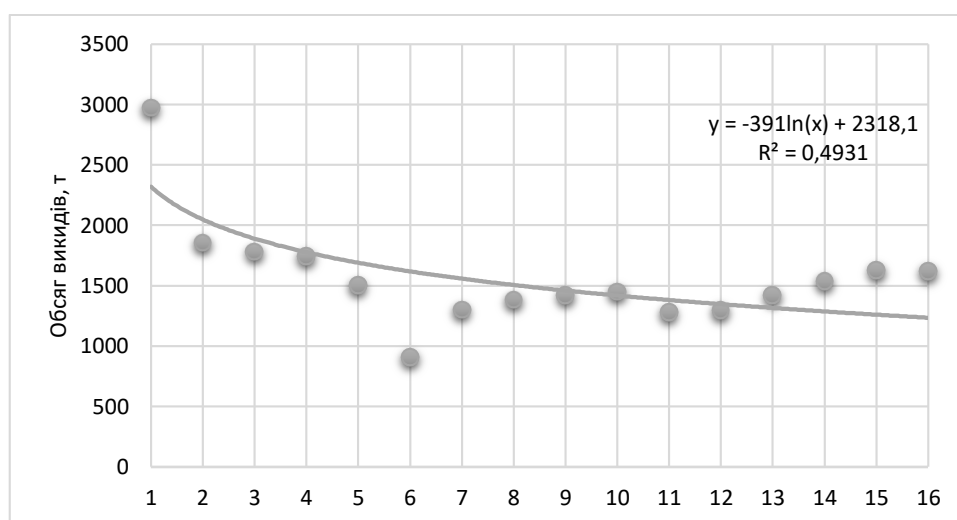
в – поліноміальна 3-го ступеня



г – експонентна



д – степенева



е – логарифмічна

Рис. 3.5. Регресійні моделі обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел за 16-ма періодами: а – лінійна; б – поліноміальна 2-го ступеня; в – поліноміальна 3-го ступеня; г – експонентна; д – степенева; е – логарифмічна

На основі значень R^2 проведене ранжування побудованих моделей, результати якого представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результат ранжування регресійних моделей за значенням R^2

Вид апроксимації	Регресійна модель	Значення R^2	Ранг
Лінійна	$y = -41,104x + 1918$	0,1983	5
Поліноміальна 2-го ступеня	$y = 15,977x^2 - 312,71x + 2732,8$	0,7017	2
Поліноміальна 3-го ступеня	$y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$	0,8182	1
Експонентна	$y = 1795,6e^{-0,019x}$	0,1423	6
Степенева	$y = 2211,2x^{-0,195}$	0,3918	4
Логарифмічна	$y = -391\ln(x) + 2318,1$	0,4931	3

Перший ранг отримала поліноміальна модель 3-го ступеню з рівнянням $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, оскільки її значення R^2 виявилось максимальним серед всіх інших і становило 0,8182; другий ранг отримала поліноміальна модель 2-го ступеня ($R^2 = 0,7017$); третій ранг – логарифмічна ($R^2 = 0,4931$); четвертий ранг – степенева ($R^2 = 0,3918$); п'ятий ранг – лінійна ($R^2 = 0,1983$); найменший шостий ранг – експонентна, оскільки її значення R^2 є найбільш віддаленим ($R^2 = 0,1423$).

Результати перевірки достовірності проведених нами розрахунків за кожною побудованою моделлю, що здійснювали шляхом порівняння отриманих даних кількості викидів з фактичними, представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати перевірки достовірності проведених розрахунків

Періоди	Лінійна	Поліноміальна 2-го ступеня	Поліноміальна 3-го ступеня	Експонентна	Степенева	Логарифмічна
1	1876,90	2436,07	2699,39	1761,81	2211,20	2318,10
2	1835,79	2171,29	2223,95	1728,65	2531,21	2047,08
3	1794,69	1938,46	1855,70	1696,11	2739,47	1888,54
4	1753,58	1737,59	1583,07	1664,19	2897,54	1776,06
5	1712,48	1568,68	1394,48	1632,87	3026,41	1688,81
6	1671,38	1431,71	1278,35	1602,14	3135,94	1617,52
7	1630,27	1326,70	1223,11	1571,99	3231,63	1557,25

8	1589,17	1253,65	1217,19	1542,40	3316,89	1505,04
9	1548,06	1212,55	1249,01	1513,37	3393,95	1458,99
10	1506,96	1203,40	1307,00	1484,89	3464,40	1417,79
11	1465,86	1226,21	1379,58	1456,94	3529,39	1380,52
12	1424,75	1280,97	1455,17	1429,52	3589,78	1346,50
13	1383,65	1367,68	1522,20	1402,62	3646,25	1315,20
14	1342,54	1486,35	1569,09	1376,22	3699,33	1286,23
15	1301,44	1636,98	1584,28	1350,32	3749,43	1259,25
16	1260,34	1819,55	1556,17	1324,90	3796,92	1234,02

Результати розрахунку загальної похибки отриманих регресійних моделей представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Загальні похибки за різними моделями

Періоди	Лінійна	Поліноміальна 2-го ступеня	Поліноміальна 3-го ступеня	Експонентна	Степенева	Логарифмічна
1	1096,10	536,93	273,61	1211,19	761,80	654,90
2	19,21	316,29	21,90	126,35	676,21	192,08
3	12,69	156,46	73,70	85,89	957,47	106,54
4	13,58	2,41	156,93	75,81	1157,54	36,06
5	211,48	67,68	106,53	131,87	1525,41	187,81
6	763,38	523,71	370,35	694,14	2227,94	709,52
7	329,27	25,70	77,89	270,99	1930,63	256,25
8	205,17	130,35	166,81	158,40	1932,89	121,04
9	123,06	212,45	175,99	88,37	1968,95	33,99
10	57,96	245,60	142,00	35,89	2015,40	31,21
11	184,86	54,79	98,58	175,94	2248,39	99,52
12	128,75	15,03	159,17	133,52	2293,78	50,50
13	36,35	52,32	102,20	17,38	2226,25	104,80
14	195,46	51,65	31,09	161,78	2161,33	251,77
15	324,56	10,98	41,72	275,68	2123,43	366,75
16	357,66	201,55	61,83	293,10	2178,92	383,98
Сума відхилень	4059,54	2603,90	2060,27	3936,30	28386,35	3586,72
Похибка	16,18	10,38	8,21	15,68	113,11	14,29

Розрахунок загальної похибки та похибки моделей для кожного з сімнадцяти періодів дав змогу побудувати рейтинг моделей (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Результат ранжування регресійних моделей за загальною похибкою

Вид апроксимації	Регресійна модель	Значення похибки	Ранг
Лінійна	$y = -41,104x + 1918$	16,18	5
Поліноміальна 2-го ступеня	$y = 15,977x^2 - 312,71x + 2732,8$	10,38	2
Поліноміальна 3-го ступеня	$y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$	8,21	1
Експонентна	$y = 1795,6e^{-0,019x}$	15,68	4
Степенева	$y = 2211,2x^{-0,195}$	113,11	6
Логарифмічна	$y = -391\ln(x) + 2318,1$	14,29	3

Найменша похибка – 12,43 – у поліноміальній моделі 3-го ступеню, і відповідно, вона має перший ранг.

Для остаточного результату щодо доцільності використання однієї з побудованих моделей для прогнозування на основі даних табл. 3.1 та 3.4 зробимо зведене ранжування (табл. 3.5)

Таблиця 3.5

Сумарні ранги прогнозних моделей

Вид апроксимації	Регресійна модель	Ранг (табл. 3.1)	Ранг (табл. 3.4)	Сума рангів
Лінійна	$y = -41,104x + 1918$	5	5	10
Поліноміальна 2-го ступеня	$y = 15,977x^2 - 312,71x + 2732,8$	2	2	4
Поліноміальна 3-го ступеня	$y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$	1	1	2
Експонентна	$y = 1795,6e^{-0,019x}$	6	4	10
Степенева	$y = 2211,2x^{-0,195}$	4	6	10
Логарифмічна	$y = -391\ln(x) + 2318,1$	3	3	6

Три моделі (лінійна, експонентна, степенева) отримали однакову суму рангів – 10, логарифмічна – 6, поліноміальна 2-го ступеня – 4. Найменша сума рангів – 2 – у поліноміальній моделі 3-го ступеня з рівнянням $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, тому для прогнозування будемо використовувати саме її.

Отриманий графік прогнозу обсягів викидів представлено на рис. 3.6.

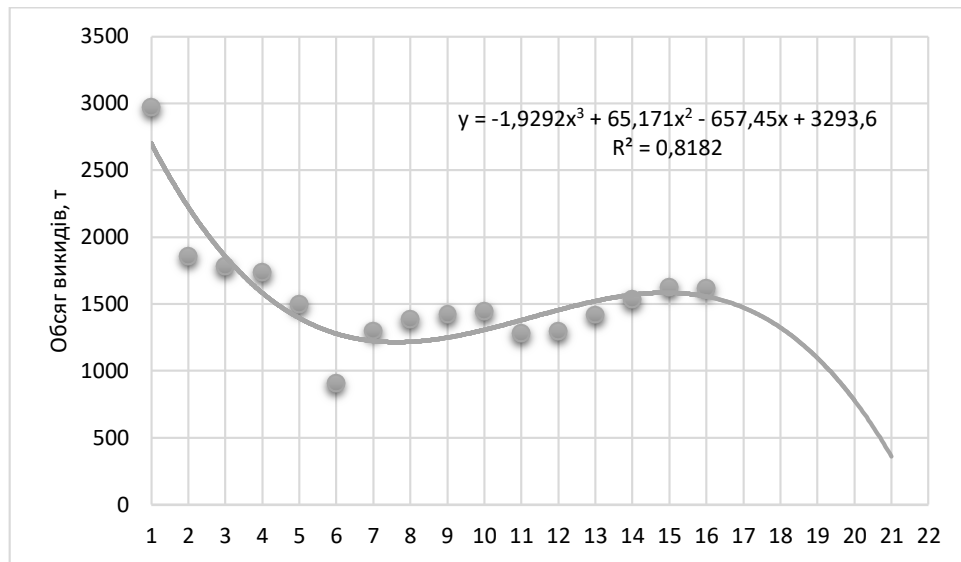


Рис. 3.6. Прогноз обсягів викидів на чотири періоди вперед

Як показує рис. 3.6, за нашим прогнозом у наступні чотири періоди обсяги викидів будуть зменшуватися і становитимуть 1106,4 т у 2023 р. та 879,4 т у 2024 р.

Висновки до розділу 3

1. Починаючи з 2005 р. в атмосферне повітря міста було викинуто понад чверть сотні тисяч тонн забруднюючих речовин. Починаючи з 2006 р., обсяги викидів не перевищували 62,4% рівня 2005 р. У складі викидів у 2020 р. переважали викиди діоксиду азоту – 530 т, що склало 33,3% загального обсягу викидів забруднюючих речовин.

2. Серед побудованих 6 регресійних моделей обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел (лінійна, поліноміальна 2-го та 3-го ступенів, експонентна, логарифмічна та степенева) найвищий сумарний ранг, що враховував величину достовірності апроксимації та значення загальної похибки, отримала поліноміальна модель 3-го ступеню $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, яку було використано для прогнозування.

3. Визначено, що у наступні періоди обсяги викидів від стаціонарних джерел в атмосферне повітря м. Житомир будуть зменшуватися.

ВИСНОВКИ

1. Починаючи з 2005 р. в атмосферне повітря міста було викинуто понад чверть сотні тисяч тонн забруднюючих речовин. Мінімальні кількості викидів за досліджуванний період – 908 т – спостерігалися у 2010 р., максимальні – 2973 т – у 2005 р. Відмічається зменшення обсягів викидів у 3,3 рази у період з 2005 р. по 2010 р., у 1,1 рази – з 2014 р. по 2015 р. та з 2019 р. А з 2010 р. по 2014 р. та з 2016 р. по 2019 р., навпаки, збільшення їх обсягів у 1,6 та 1,3 рази відповідно.

2. Починаючи з 2006 р., обсяги викидів не перевищували 62,4% рівня 2005 р.

3. Значення обсягів викидів по місту становили від 4,9% (у 2010 р.) до 22,3% (у 2005 р.).

4. У складі викидів у 2020 р. переважали викиди діоксиду азоту – 530 т, що склало 33,3% загального обсягу викидів забруднюючих речовин

5. Побудовано 6 регресійних моделей обсягів викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел: лінійна ($y = -41,104x + 1918$), поліноміальна 2-го ($y = 15,977x^2 - 312,71x + 2732,8$) та 3-го ступенів ($y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$), експонентна ($y = 1795,6e^{-0,019x}$), логарифмічна ($y = -391\ln(x) + 2318,1$) та степенева ($y = 2211,2x^{-0,195}$)

6. За величиною достовірності апроксимації ($R^2 = 0,8182$) та за значенням загальної похибки (12,43) перший ранг отримала поліноміальна модель 3-го ступеню.

7. Для прогнозування використовуємо поліноміальну модель 3-го ступеню з рівнянням $y = -1,9292x^3 + 65,171x^2 - 657,45x + 3293,6$, за яким у наступні періоди обсяги викидів від стаціонарних джерел будуть зменшуватися.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Артемчук В.О. Наукові основи визначення екологічної ефективності прийняття управлінських рішень на прикладі охорони атмосферного повітря: автореф. дис. ... д. т. н. : 21.06.01 - Екологічна безпека; Державний заклад "Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління". 2021. 42 с.
2. Біляєв М. М. Моделювання і прогнозування стану довкілля : підручник для студентів вищ. навч. закладів. Кривий Ріг: Р. А. Козлов, 2016. 207 с.
3. Біляєв М.М., Берлов О.В., Губін О.І., Гунько О.Ю., Машихіна П.Б. Чисельне моделювання забруднення атмосфери при екстремальній ситуації на хлоропереливній станції. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. №6. С.14-21. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.14.810>.
4. Біляєв М.М., Русакова Т.І. Комплексна оцінка впливу інгредієнтів викидів промислових підприємств на рівень забруднення повітря внутрішніх майданчиків. *Ecological Safety and Labour Protection*. 2019. №57. С.158-168. DOI: 10.33271/crpnmu/57.158.
5. Герасимчук Л.О., Костюченко Р.В., Потаржевський Є.Б. Зв'язок між станом забруднення атмосферного повітря та захворюваністю урбанізованого населення. *Екологія. Наука. Практика – 2022*: мат-ли XVIII Всеукр. наук.-практ. конф., 21 травня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 25–26.
6. Головне управління статистики у Житомирській області : офіційний веб-сайт. URL: <http://www.zt.ukrstat.gov.ua>.
7. Горошкова Л.А., Хлобистов Є.В., Трофимчук В.О. Економіко-статистичне моделювання детермінант динаміки забруднення довкілля України. *Економіка і організація управління*. 2019. № 2(34). С.46-55. DOI: 10.31558/2307-2318.2019.2.5.

8. Державна служба статистики України: офіційний веб-сайт. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>.
9. Дячук О.А. Прогнозування та оцінка викидів парникових газів прямої дії з використанням моделі "Times-Україна". *Економіка і прогнозування*. 2013. №2. С. 116-127.
10. Заграй Я.М., Котовенко О.А. Моделювання і прогнозування стану довкілля : навч. посіб. К., 2007. 119 с.
11. Ковпак Е.О., Михайленко В.Г., Масленнікова О.В. Регресійні моделі динаміки шкідливих викидів в атмосферу України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Економічна*. 2017. №93. С. 119-128.
12. Кривенко Г.М. Аналіз викидів парникових газів у атмосферне повітря об'єктами нафтогазового комплексу. *Науково-технічний журнал*. 2020. №2(22). С.48-57. DOI: 10.31471/2415-3184-2020-2(22)-48-57.
13. Моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, що використовуються під час складання звіту з ОВД. URL: <https://ecolog-ua.com/news/modeli-poshyrennya-zabrudnyuyuchyuh-rechovyn-v-atmosfernomu-povitri-shcho-vykorystovuyutsya-pid>.
14. Моделювання та прогнозування стану довкілля : навч. посіб. / Чернівецький національний ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці : Рута, 2004. Ч. 2 : Моделювання розсіювання шкідливих домішок у атмосфері та водних об'єктах / уклад. Б. В. Скіп.: [б.в.], 2005. 59 с.
15. Попов О.О., Яцишин А.В., Ковач В.О., Артемчук В.О., Куценко В.О. Розроблення математичної моделі забруднення атмосфери за умов довготривалих викидів потенційно-небезпечних джерел. *Моделювання та інформаційні технології*. 2019. №89. С. 50-63.
16. Потаржевський Є.Б. Промислові викиди в атмосферне повітря та їх моделювання. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: мат-ли Міжнар. наук.-практ. конф. молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої*

освіти, 11-12 травня 2023 р. Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2023.

17. Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України; Стратегія, План від 20.10.2021 № 1363-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-п>.

18. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента України №722/2019 URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825>.

19. Саєнко М.С. Моделювання як метод наукового пізнання, типи моделей. URL: http://repository.pdmu.edu.ua/bitstream/123456789/10711/1/Modeluvannya_yak_metod_naykovoho_piznannya.pdf.

20. Ястремський О.І., Кулик В.В. Повне навантаження обсягів викидів на кінцевий попит в агрегованій міжгалузевій моделі України. *Проблеми економіки*. 2020. № 2. С. 166-174.

21. Bennedsen M., Hillebrand E., Koopman S.J. Modeling, forecasting, and nowcasting U.S. CO₂ emissions using many macroeconomic predictors. *Energy Economics*. 2021. №96(C). DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105118.

22. Demir A.S. Modeling and forecasting of CO₂ emissions resulting from air transport with genetic algorithms: the United Kingdom case. *Theor Appl Climatol*. 2022. №150. P. 777–785. DOI: 10.1007/s00704-022-04203-4.

23. Emission modelling. URL: <https://www.bsc.es/research-development/research-areas/atmospheric-composition/emission-modelling>.

24. Emissions models and other methods to produce emission inventories. URL: <https://www.epa.gov/moves/emissions-models-and-other-methods-produce-emission-inventories>.

25. Industrial emission statistics. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Industrial_emission_statistics.

26. Integrated modelling method: an introduction with John Owens : Data Quality Pro. URL: <https://www.dataqualitypro.com/blog/integrated-modelling-method-john-owens>.
27. Kamoljitprapa P., Sookkhee S. Forecasting models for carbon dioxide emissions in major economic sectors of Thailand. *Journal of Physics*. 2022. Conference Series 2346. 012001. DOI:10.1088/1742-6596/2346/1/012001.
28. Pao H.-T., Tsai C.-M. Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil. *Energy*. 2011. №36(5). P. 2450–2458. DOI: 10.1016/j.energy.2011.01.032.
29. Rahman A., Hasan M. Modeling and forecasting of carbon dioxide emissions in Bangladesh using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Models. *Open Journal of Statistics*. 2017. №7. P. 560–566. DOI: 10.4236/ojs.2017.74038.
30. Tawiah K., Daniyal M., Qureshi M. Pakistan CO₂ emission modelling and forecasting: a linear and nonlinear time series approach. *Journal of Environmental and Public Health*. 2023. 5903362. DOI: 10.1155/2023/5903362.