

Given that the function is concave, *Figure 1* shows the  $n$ th term of the series (1) is the area of the curved blue trapezoid. In particular, all terms in this series are nonnegative.

**Theorem 1.** If  $f(x) = \ln x$ , then the series (1) converges and all terms of this series are positive.

**Theorem 2.** If  $f(x) = \ln x$ , then

$$\sum_{n=1}^N (S_{[n,n+1]}(f) - \frac{f(n) + f(n+1)}{2}) = \ln \frac{(N+1)^{(N+1)\sqrt{N+1}}}{e^N(N+1)!}.$$

**Theorem 3** (Moivre's formula). There exists a constant  $> \frac{1}{e}$ , such that  $n! \sim C\sqrt{n}\left(\frac{n}{e}\right)^n, n \rightarrow \infty$ .

Now we obtain the following corollary from the Moivre-Stirling formula.

**Corollary.** If  $f(x) = \ln x$ , then

$$\sum_{n=1}^{\infty} (S_{[n,n+1]}(f) - \frac{f(n) + f(n+1)}{2}) = 1 - \ln(\sqrt{2\pi}).$$

*References:*

1. *Wikipedia contributors. (n.d.). Stirling's approximation. Wikipedia. [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Stirling%27s\\_approximation](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Stirling%27s_approximation). Date of request: 29.11.2025.*
2. *Feller W. (1968). An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol. 1, 3rd Edition, Wiley.*
3. *Фіхтенгольц Г.М. (2024). Курс диференціального та інтегрального числення.*
4. *Дороговцев А.Я. (1994). Математичний аналіз, ч. I. – К.; Либідь.*

УДК 628.4:004.9:621.391:004.77

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД  
ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**Бредун В.І, PhD, доцент**

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*  
[nning.bredunvi@nupp.edu.ua](mailto:nning.bredunvi@nupp.edu.ua)

Ефективне поводження з ТПВ залишається однією з найгостріших екологічних та інфраструктурних проблем для більшості регіонів України, зокрема для сільських територіальних громадах (ТГ) Полтавської області. Низька щільність забудови, значні відстані між населеними пунктами та відносно невеликі обсяги утворення відходів ускладнюють процеси збору та транспортування, що часто призводить до високих операційних витрат та низької рентабельності.

У світлі європейської інтеграції та необхідності переходу до кластерної моделі управління відходами, застосування цифрових технологій набуває особливого значення. Європейський досвід свідчить, що системи моніторингу наповненості контейнерів та динамічна оптимізація маршрутів сміттєвозів забезпечують суттєву економію ресурсів та зменшення вуглецевого сліду. Таким чином, актуальність дослідження полягає у необхідності адаптації та обґрунтування застосування цих інноваційних рішень в умовах українських територіальних громад.

На сьогоднішній день системи управління відходами у ТГ Полтавщини стикаються з трьома основними групами проблемних факторів: організаційними, технологічними та логістичними. З організаційної точки зору, ключовими бар'єрами є недостатнє фінансування комунальних підприємств, брак кваліфікованих кадрів для роботи з високотехнологічними системами та

низький рівень екологічної свідомості населення. Технологічний аспект характеризується застарілістю автопарку (в окремих громадах досі експлуатується транспортне обладнання віком 20–30-років) та повною відсутністю комп'ютеризованих систем та геоінформаційних технологій для управління.

Найбільш значущими є логістичні проблеми: маршрути сміттєвозів є статичними та визначені схемами санітарної очистки, що призводить до неефективного використання часу та пального, оскільки збір відходів здійснюється незалежно від фактичного рівня наповненості контейнерів.

Впровадження цифрових рішень здатне вирішити ці логістичні та технологічні проблеми. Досвід країн ЄС, зокрема Італії та Великої Британії, демонструє успішне застосування:

1. IoT-систем (датчики з ультразвуковими сенсорами) для моніторингу завантаженості контейнерів у режимі реального часу.

2. RFID-систем для автоматичного ідентифікування контейнерів та обліку обсягів відходів від кожного користувача, що сприяє запровадженню принципу «плати за те, що викидаєш».

3. Спеціалізованих мобільних додатків для громадян, які забезпечують зворотний зв'язок та оперативне інформування про проблеми.

Застосування таких рішень дозволяє перейти до оперативного (динамічного) планування маршрутів, зменшити пробіг сміттєвозів, знизити витрати на паливо та мінімізувати шкідливі викиди, що є особливо актуальним для обслуговування малонаселених пунктів.

Впровадження цифрового моніторингу ТПВ не є універсально виправданим для всіх ТГ. У кожній громаді існують свої особливості, які суттєво впливають на оперативну доцільність та можливість впровадження таких систем.

Доцільність визначається, насамперед, обсягами утворення відходів, особливо з огляду на необхідність рентабельного збирання ресурсоцінних фракцій. Також важливу роль відіграє організаційна складова системи збирання (наприклад, збір відходів біля кожного подвір'я) та економічні показники, які забезпечують термін окупності технології.

Можливість впровадження безпосередньо залежить від: наявності достатнього бюджетного фінансування, забезпеченості висококваліфікованими технічними кадрами, наявності необхідної інфраструктури (стабільне інтернет-з'єднання та якість дорожньої мережі).

На основі аналізу цих факторів було розроблено категорії диференціації громад Полтавської області та рекомендації щодо впровадження цифрових технологій у місцеві системи управління відходами.

Громади, віднесені до категорії «Готові до впровадження» (зокрема, Полтавська, Кременчуцька), повинні розпочати негайну інтеграцію IoT-систем та розробку власних мобільних додатків, одночасно проводячи тендерні процедури на закупівлю обладнання та навчання персоналу. Для громад «Попередньої готовності» (наприклад, Опішнянська) рекомендовано пілотне впровадження технологій з подальшим системним масштабуванням та посиленням навчання робітників. Громади з «Потенціалом до розвитку» (наприклад, Диканська) мають сфокусуватися на проведенні ґрунтового аналізу доцільності, технологічній підготовці та активізації міжмуніципальної співпраці у межах кластеру. Для ТГ, що демонструють низький рівень готовності, через низькі економічні та демографічні показники, впровадження може бути економічно не виправданим. Їм рекомендовано сконцентруватися на базових аспектах покращення інфраструктури та пошуку джерел фінансування.

Таким чином, інтеграція цифрових технологій є перспективним стратегічним напрямком для розвитку систем управління відходами у ТГ Полтавської області. Впровадження IoT-технологій забезпечує ключову перевагу – перехід від статичного до динамічного планування маршрутів, що критично важливо для оптимізації логістики особливо у сільській місцевості.

Запропонована диференціація та відповідні рекомендації дозволяють громадам об'єктивно оцінити свій потенціал і обрати оптимальну траєкторію діджиталізації. Успішна реалізація цих рекомендацій сприятиме підвищенню фінансової та екологічної ефективності системи управління відходами, що, своєю чергою, позитивно вплине на екологічний стан регіону та якість життя населення.

**УДК 504.5:[621.43.068:629.33]/37**

**ВПЛИВ ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ АВТОТРАНСПОРТУ НА ДОВКІЛЛЯ**

**Бунякіна Н.В.**, к.х.н., доцент,  
**Дрючко О.Г.**, к.х.н., доцент,  
**Дорошенко М.О.**, студентка  
*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*  
[n.bunyakina@gmail.com](mailto:n.bunyakina@gmail.com)

Важко уявити сучасну людину без автомобіля. У розвинутих країнах автомобіль вже давно став найнеобхіднішою побутовою річчю. Рівень так званої «автомобілізації» населення став одним з основних економічних показників розвитку країни й якості життя населення.

Станом на кінець 2020 року глобальний парк легкових автомобілів сягнув відмітки у 1 млрд 180 млн одиниць [1]. За 2021 рік у світі випустили 80,2 млн авто, що на 3% більше, ніж у 2020 році. Така тенденція на збільшення випуску автомобілів зберігається і в 2025 році.

За багаторічними дослідженнями [2] український автопарк транспортних засобів станом на 2024 рік становить 12 млн. одиниць. У цю кількість входить значна кількість застарілих транспортних засобів віком більше 40 – 50 років. Таких автомобілів налічується кілька мільйонів.

Автотранспорт є основним джерелом забруднення повітря у великих містах. Вихлопні гази накопичуються у нижніх шарах атмосфери, тобто шкідливі речовини знаходяться в зоні дихання людини. Тому автомобільний транспорт відносять до категорії найнебезпечніших джерел забруднення повітря.

Для визначення сумарного обсягу вихлопних газів можна орієнтуватися на те, що один літр спалюваного бензину призводить до утворення приблизно 16 м<sup>3</sup> або 16000 л суміші різних газів. До складу газів, які виділяються внаслідок спалювання палива у двигунах внутрішнього згорання, міститься більше 200 найменувань шкідливих речовин, у тому числі канцерогених [3].

Окрім атмосферного повітря відбувається забруднення придорожніх смуг та водних об'єктів нафтопродуктами, залишками від стертих шин і гальмівних колодок, сипкими і пиловими вантажами, хлоридами, які використовують для посипання доріг взимку.

Забруднення довкілля транспортними і дорожніми викидами накопичується поступово, залежно від кількості автотранспорту, що проїжджає через трасу, дорогу, магістраль, і зберігається дуже довго навіть після ліквідації дорожнього полотна.

Викиди автотранспорту не тільки забруднюють атмосферне повітря, але й зменшують кількість атмосферного кисню: за рік один автомобіль використовує 4 т кисню [3].

Ще одним наслідком забруднення довкілля вихлопними газами є тенденція до збільшення захворюваності населення, яке пов'язане з підвищеним вмістом забруднювачів в атмосферному повітрі.

Для скорочення викидів від автомобільного транспорту слід запровадити такі основні заходи [4]:

- 1) скоротити витрати палива, що є значною статтею витрат;