

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОСИСТЕМ М. ЗАПОРІЖЖЯ

Свердленко Д.О.¹, Горбань В.В.¹, Терещенко О.О.²

¹Запорізький національний університет
вул. Жуковського, 66, 69600, м. Запоріжжя

²Державна екологічна інспекція Південного округу (Запорізька та Херсонська області)
вул. Незалежної України, 72А, 69035, м. Запоріжжя
dima.sverdlenko5@gmail.com, valera251077@gmail.com, olgatereshchenko17@gmail.com

Один із ключових принципів, що описує потік енергії у екосистемах, визначається другим законом термодинаміки, який стверджує, що енергія розсіюється на кожному послідовному етапі свого перетворення. Розсіювання енергії тісно пов'язане із її здатністю до виконання роботи. Концепція дисипативних структур, що була вперше розглянута І. Пригожиним, визначає спроможність організмів трансформувати енергію та впорядковувати речовину так, що мінімізується витрата енергії на виконання роботи. Отже, можна говорити про постійну трансформацію енергії в більш високоякісну на кожному наступному етапі. Г. Одум розробив методику для оцінки якості енергії і введення термінів «емергія» та «індекс трансформації». У нашій роботі ми використовували підхід Г. Одума для оцінки потоку, накопичення та трансформації енергії в екосистемах міста Запоріжжя. Це дозволяє нам оцінити потенціал відновлювальних та невідновлювальних джерел енергії в складній урбаністичній екосистемі міста Запоріжжя.

Розглянуто вплив людської діяльності на енергетичний баланс та стійкість природних екосистем у міському середовищі. Зосереджуючи увагу на вивченні взаємодії між компонентами екосистеми та енергетичними процесами для розуміння основних взаємозв'язків, які впливають на стан довкілля та його здатність до саморегуляції. Ми можемо сказати, що екосистеми в містах відіграють важливу роль у підтриманні екологічного балансу та забезпеченні добробуту населення. Тому, розуміння складного функціонування природної та урбанізованої складової екосистем полягає у проведенні енергетичного (емерджентного) аналізу. Визначено, що енергетичний аналіз є важливим інструментом для розуміння та управління екосистемою міста Запоріжжя з метою збалансованого та сталого розвитку. Розрахунок емергії природної та урбанізованої складової екосистеми показав, що серед всіх показників найменше значення мали емергія сонця і дощу, геопотенційна, а також забрана вода і підземні джерела. *Ключові слова:* енергетичний аналіз, емергія, екосистема, місто Запоріжжя, урбанізація, стратегії сталого розвитку, індекс трансформації.

Energy analysis of the functioning of Zaporizhzhia ecosystems. Sverdlenko D., Horban V., Tereshchenko O.

One of the key principles describing the flow of energy in ecosystems is defined by the second law of thermodynamics, asserting that energy dissipates at each successive stage of its transformation. The dissipation of energy is closely linked to its ability to perform work. The concept of dissipative structures, first introduced by I. Prigogine, determines the ability of organisms to transform energy and organize matter in a way that minimizes the energy expenditure for work. Thus, we can speak of a continuous transformation of energy into higher quality at each subsequent stage. H. Odum developed a methodology to assess the quality of energy and introduced the terms 'emergy' and 'transformity.' In our study, we employed H. Odum's approach to evaluate the flow, accumulation, and transformation of energy in the ecosystems of Zaporizhzhia city. This enables us to assess the potential of renewable and non-renewable energy sources in the complex urban ecosystem of Zaporizhzhia.

Considered the impact of human activity in the energy balance and sustainability of skill-producing in the urban environment focusing on the study of interactions between ecosystem components and energy processes; to understand the main relationships that affect the state of the environment and its ability to self-regulate. We can say that ecosystems in cities play an important role in maintaining the ecological balance and ensuring the well-being of the population. Therefore, understanding the complex functioning of the natural and urbanized component of ecosystems consists in conducting an energy (emergent) analysis. It has been determined that energy analysis is a crucial tool for understanding and managing the ecosystem of Zaporizhzhia city with the aim of achieving balanced and sustainable development. The calculation of emergy for both the natural and urbanized components of the ecosystem revealed that, among all indicators, solar and rainfall emergy, geopotential, as well as withdrawn water and underground sources had the least significance. *Key words:* energy analysis, emergy, ecosystem, city of Zaporizhzhia, urbanization, sustainable development strategies, transformation indices.

Постановка проблеми. Зростаючі темпи урбанізації і розвитку міст створюють складні виклики для екологічної стійкості та енергоефективності. Такі міста, як Запоріжжя, є екосистемами з надзвичайно складною взаємодією між людською діяльністю та природним середовищем, що є важливим для забезпечення комфорту проживання та сталого розвитку. Однак, необхідний ретельний аналіз та розуміння енергетичних процесів, що впливають на функціонування екосистем Запоріжжя.

Одна із ключових проблем – це недостатня увага до вивчення енергетичного балансу урбанізованої складової екосистеми та її впливу на стан природних ресурсів. Сучасні дослідження недостатньо охоплюють взаємодію між різними аспектами міського життя та енергетичними процесами, враховуючи їхній вплив на екологічну стійкість екосистеми.

Ще однією проблемою є відсутність комплексного підходу вивчення взаємодії між міським середовищем та енергетичними системами. Це ускладнює

розуміння зв'язків між виробництвом енергії, її споживанням, та впливом на біорізноманіття, водні ресурси та повітряне середовище.

Крім того, місто Запоріжжя, потребує вивчення можливостей оптимізації використання енергії з метою підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище.

Тому необхідно провести детальний енергетичний аналіз функціонування екосистеми з урахуванням впливу людської діяльності та енергетичних процесів на стійкість природних ресурсів і загальний екологічний стан міського середовища.

Актуальність дослідження. Вивчення різних екологічних систем у міському середовищі, оцінка їх взаємозалежності та аналіз впливу людської діяльності на ці екосистеми. Використовуючи різні наукові методології та методи збору даних, дослідження надасть цінну інформацію про поточний стан екосистем у Запоріжжі, розкриваючи як сильні, так і вразливі сторони. Результати цього дослідження сприятимуть розумінню міської екології, сталого розвитку та розробці ефективних стратегій збереження та управління довкіллям.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Внесок автора в енергетичний аналіз функціонування екосистем м. Запоріжжя є ключовим для вирішення наукових і практичних завдань у цій галузі, і визнається наступним чином:

Розуміння енергетичного балансу урбанізованої складової екосистеми: проведений аналіз дозволяє розібратися у складних взаємозв'язках між енергетичними потоками та функціонуванням екосистеми міста. Це важлива наукова задача для усвідомлення причинно-наслідкових зв'язків між енергією, яку споживає місто, та її впливом на навколишнє природне середовище.

Розробка стратегії енергоефективності та сталого розвитку може надати можливість визначити сфери, в яких можна підвищити енергоефективність у Запоріжжі. Оскільки, це важливе практичне завдання, науковий аналіз може сприяти формуванню стратегій і політики, спрямованих на оптимізацію використання енергії та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Підвищення екологічної стійкості міського середовища, тобто енергетичні аспекти ідентифікують основні джерела енергії та їх вплив на екосистему. Це, по-перше, є науково-практичним завданням, оскільки воно допомагає розробити стратегії збереження природних ресурсів та підтримки біорізноманіття міських екосистем.

Формування науково-обґрунтованих рекомендацій для міського планування, своєю чергою, є основою для розробки конкретних рекомендацій для міських влад, спрямованих на покращення управління енергетичними ресурсами та планування містобудівних проєктів.

Отже, проведення енергетичного аналізу функціонування екосистем міста Запоріжжя є важливим кроком для вирішення актуальних наукових.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проаналізувавши дослідження з таких джерел, як Звіт про стратегічну екологічну оцінку Стратегії регіонального розвитку Запорізької області на період до 2027 року, Інформаційний екологічний атлас Запорізької області, Екологічний паспорт Запорізької області за 2020–2021 роки, Звіт про аналіз потенціалу енергетичної ефективності м. Запоріжжя, Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Запорізької області у 2020 році та стаття У. М. Альошкіна Енергетичний аналіз функціонування екосистем м. Києва. Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. УРБОЕКОЛОГІЯ. *Екологія та ноосферологія*. 2008. Т. 19, № 1–2. С. 78–85, ми розраховали та зробили висновки стосовно функціонування екосистем міста Запоріжжя.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття є:

- 1) розрахунок енергії функціонування природної складової міста;
- 2) розрахунок енергії функціонування урбанізованої складової міста;
- 3) проведення порівняльної характеристики природної та урбанізованої складової міста Запоріжжя.

Новизна даного дослідження є важливою та інноваційною для розвитку як наукових досліджень, так і практичної підготовки фахівців у галузі охорони навколишнього середовища та містобудування. Застосування методів енергетичного аналізу дозволяє зрозуміти сучасні міські екологічні процеси з акцентом на взаємодію міських екосистем з навколишнім природним середовищем.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у важливому внеску до наукових досліджень та практичної підготовки в галузі управління міськими ресурсами та охорони навколишнього середовища, що має вирішальне значення для розуміння та оптимізації взаємодії різних екосистем.

Таким чином, основною ідеєю теми є аналіз міської енергетики, тобто це потужний інструмент для покращення функціонування міст, підвищення якості життя населення та створення сталого середовища, орієнтованого на їхні природні компоненти. Передусім визначаючи пріоритети та оптимальні стратегії сталого розвитку міста Запоріжжя.

Виклад основного матеріалу Аналіз функціонування природної та урбанізованої складових екосистем м. Запоріжжя проводився за 2020–2021 роки.

З метою подальшого аналізу екосистем міста, було запропоновано енергетичний аналіз на основі поняття «енергія», введеного Г. Одумом і розробленої ним методики.

Енергетичний потенціал природної складової міста Запоріжжя розраховували за наступними формулами:

1. Сонце = $4,00 \times 10^9$ Дж/м²/рік (енергія сонячного сьйва) $\times 331 \times 10^6$ м² (S м. Запоріжжя) = $1,324 \times 10^{18}$ Дж.

2. Вітер (кінетична енергія) = $0,5 \times 331 \times 10^6$ м² $\times 1,23$ кг/м³ (щільність) $\times (5,1$ м/с)³ (середня швидкість) = $9,38 \times 10^{19}$ Дж.

3. Дощ (потенційна енергія) = 331×10^6 м² $\times 0,49$ м (кількість опадів) $\times 997$ кг/м³ (щільність) $\times 4940$ Дж/кг (енергія Гіббса) = $7,98 \times 10^{14}$ Дж $\approx 0,79 \times 10^{15}$ Дж.

4. Дощ (геопотенційна енергія) = 331×10^6 м² $\times 0,49$ м (кількість опадів) $\times 997$ кг/м³ (щільність води) $\times 86$ м (висота над рівнем моря) $\times 9,8$ м/с² (прискорення вільного падіння) = $1,4 \times 10^{14}$ Дж.

5. Ґрунт = 331×10^6 м² $\times 2,26 \times 10^7$ Дж/кг $\times 0,65$ кг/рік (швидкість формування Ґрунту в лісових екосистемах) $\times 0,03$ (органічна фракція Ґрунту) = $1,46 \times 10^{14}$ Дж.

6. Вода Дніпро = $0,12 \times 10^{10}$ м³/рік (витрата води) $\times 1000$ кг/м³ (щільність) $\times 4940$ Дж/кг (енергія Гіббса) = $0,59 \times 10^{17}$ Дж.

8. Забрана вода Дніпро = $181,15$ млн м³/рік (об'єм забраної води) $\times 1000$ кг/м³ (щільність води) $\times 4940$ Дж/кг (енергія Гіббса) = $8,9 \times 10^{14}$ Дж.

9. Забрана вода, підземні джерела = $45,78$ млн м³/рік (об'єм забраної води) $\times 1000$ кг/м³ (щільність води) $\times 4940$ Дж/кг (енергія Гіббса) = $2,26 \times 10^{14}$ Дж.

10. Спожита енергія викопного палива = $9,095 \times 10^3$ т ум. пал. $\times 29,3$ МДж $\approx 2,7 \times 10^{11}$ Дж. (Теплота згоряння 1 кг ум. пал. / 1 м³ газоподібного ум. пал. складає 29,3 МДж (7000 ккал), що майже відповідає теплоті згоряння 1 кг кам'яного вугілля.

11–14. Макроекономічні показники: імпорту = $0,3 \times 10^9$ \$, експорту = $0,72 \times 10^9$ \$, придбання товарів та послуг = $9,24 \times 10^8$ \$, випуску товарів та послуг = $7,6 \times 10^{10}$ \$ у грошових одиницях.

15. Населення: 750685 тис. осіб $\times 51$ рік (середній вік населення) = $3,8 \times 10^7$ люд/років.

16. 129×10^6 кг (маса органічних відходів міста) $\times 5000$ ккал/кг $\times 4186$ Дж/ккал = $1,8 \times 10^{12}$ Дж – відходи органічної фракції; 139×10^6 кг (маса неорганічних відходів міста) $\times 14200$ Дж/кг (енергія Гіббса для залізної руди) = $2,91 \times 10^{15}$ Дж – відходи неорганічної фракції.

17. Завдяки значенню ВРП (Валового регіонального продукту), можна розрахувати показник енергетичної вартості долара (енергія/долар) або індекс трансформації для долара. Чим вищий цей показник, тим більша спроможність купівлі долара в регіоні, і таким чином, регіон є менш розвинутим економічно.

Для розрахунку вартості у Сдоларах всіх компонентів урбоєкосистеми, потрібно розрахувати середній індекс трансформації Сдолара для світу з врахуванням співвідношень валют:

$$\begin{aligned} \text{USD}X &= 50,14348112 \times \text{USDEUR}^{0,576} \times \\ &\text{USDJPY}^{0,136} \times \text{USDGBP}^{0,119} \times \text{USDCAD}^{0,091} \times \\ &\times \text{USDSEK}^{0,042} \times \text{USDCHF}^{0,036} = 50,14348112 \times 0,95^{0,576} \times 149,57^{0,136} \times 0,82^{0,119} \times 1,36^{0,091} \times 10,92^{0,042} \times 0,90^{0,036} = \\ &106,42 \approx 1,06 \times 10^{12} \text{ Дж}/\$, \end{aligned}$$

де USDEUR^{0,576} – відсоткове співвідношення Євро; USDJPY^{0,136} – відсоткове співвідношення Японської єни; USDGBP^{0,119} – відсоткове співвідношення Фунта стерлінгів; USDCAD^{0,091} – відсоткове співвідношення Канадського долару; USDSEK^{0,042} – відсоткове співвідношення Шведської крони; USDCHF^{0,036} – відсоткове співвідношення Швейцарського франку. Всі вищезазначені розрахунки представлені в таблиці 1.

Згідно нашим дослідженням, найбільшу енергетичну вартість серед показників природної складової мають поверхневі води (вода Дніпро), що пояснює будівництво ГЕС на річках. Наступними за величиною потенціалу виділяють значення енергії Ґрунту (акумуляована органіка), енергії зеленої зони, дощу, вітру і сонця.

Попри значні показники енергії, енергія сонця ($0,13 \times 10^{19}$ СДж) і дощу, геопотенційна Е ($0,12 \times 10^{19}$ СДж) мають найменші значення.

Стосовно енергетичного потенціалу урбанізованої складової міста Запоріжжя, то ми чітко бачимо, що найбільше значення мають населення та ВРП (валовий регіональний продукт). Оскільки, місто Запоріжжя є промисловим центром з розвинутою металургійною, машинобудівною та енергетичною промисловістю, то це, по-перше, сприяє значному збільшенню показника ВРП через великий обсяг виробництва та експорту. І враховуючи, що місто має історичну цінність, таким чином, приваблюючи населення через робочі можливості та інші переваги міського життя. Також, Запорізька область розташована на берегах Дніпра і відіграє важливу роль, як транспортний вузол для товарів і людей. Це передусім сприяє розвитку та економічному зростанню регіону.

Проте, серед показників урбанізованої складової екосистеми найменшу енергію складають забрані води. Це пояснюється тим, що в місті є екологічна незбалансованість, тобто відбувається великий тиск на водні ресурси через потреби самого міста, враховуючи його види промисловості, домогосподарство та інші можливі варіанти діяльності. Забруднення водойм також відіграє роль у цьому, адже, існують проблеми забруднення стічними водами і ускладнення процесів очищення води для пиття. І ще однією причиною, є неефективне використання ресурсів, що визначається втратою в системах водопостачання та недостатньою оптимізацією споживання води.

Головні висновки. На основі проведеного аналізу визначено, що енергетичний аналіз є важливим інструментом для розуміння та управління екосистемою міста Запоріжжя з метою збалансованого та сталого розвитку.

Розрахунок енергії природної та урбанізованої складової екосистеми показав, що серед всіх показників найменше значення мали енергія сонця ($0,13 \times 10^{19}$ СДж) і дощу, геопотенційна Е ($0,12 \times 10^{19}$ СДж), а також забрана вода, Дніпро ($4,3 \times 10^{19}$ СДж) і підземні джерела ($2,5 \times 10^{19}$ СДж).

Таблиця 1

Показники енергетичного потенціалу екосистем міста Запоріжжя

Енергетичний потенціал	Показники енергії та ресурсів	Індекс трансформації	Емергія, СДж, 10 ¹⁹	Значення в Сдоларах, 10 ⁸
Енергетичний потенціал природної складової міста				
1. Сонце	1,324×10 ¹¹	1 СДж/Дж	0,13	0,0014
2. Вітер, кінетична енергія	9,38×10 ¹⁹	1268 СДж/Дж	1,19	0,0126
3. Дощ, потенційна енергія	0,79×10 ¹⁵	15423 СДж/Дж	1,22	0,0129
4. Дощ, геопотенційна енергія	1,4×10 ¹⁴	8888 СДж/Дж	0,12	0,0127
5. Ґрунт	1,46×10 ¹⁴	63000 СДж/Дж	9,19	0,97
6. Вода Дніпра	0,59×10 ¹⁷	48459 СДж/Дж	2859,1	30,3
7. Зелена зона	32,76×10 ¹³	616,6 СДж/Дж	2,02	0,0214
Енергетичний потенціал урбанізованої складової міста				
8. Забрана вода, Дніпро	8,9×10 ¹⁴	48459 СДж/Дж	4,3	0,4558
9. Забрана вода, підземні джерела	2,26×10 ¹⁴	110000 СДж/Дж	2,5	0,0265
10. Спожита енергія, умовне паливо	2,7×10 ¹¹	40000 СДж/Дж	1080	11,45
11. Імпорт	0,3×10 ⁹	2,6·10 ¹² СДж/\$	7800	827
12. Експорт	0,72×10 ⁹	2,6·10 ¹² СДж/\$	1870	19,82
13. Придбання товарів та послуг	9,24×10 ⁸	2,6·10 ¹² СДж/\$	2400	25,44
14. Випуск товарів та послуг	7,6×10 ¹⁰	2,6·10 ¹² СДж/\$	1970	20,88
15. Населення	3,8×10 ⁷ люд/років	3,1·10 ¹⁶ СДж/люд /років	117800	1248,68
16. Тверді відходи (Органічна фракція)	2,91×10 ¹⁵	1800000 СДж/Дж	523,8	55,52
16. Тверді відходи (Неорганічна фракція)	1,8×10 ¹²	1800000 СДж/Дж	324	34,35
17. ВРП	6,63×10 ¹⁰	1,77×10 ¹² СДж/\$	11735,1	0,00125

В свою чергу, це пояснюється багатьма факторами, проте, і визначає необхідність провести більш детальне дослідження для оптимізації і збереження навколишнього природного середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. По-перше, такий підхід аналізу, дозволить виявити аспекти взаємодії різних частин екосистеми міста, що в свою чергу, призведуть до відкриття нових шляхів для збереження природних ресурсів та оптимізації функціонування самого міста. По-друге, це інструмент

для розробки стратегій стійкого розвитку міста, де враховуються не тільки природні процеси, а й соціальні та економічні аспекти для покращення життя населення та збереження навколишнього природного середовища. Також допоможуть виявити потенційні проблеми та кризові ситуації, щоб розробити стратегії для передбачення їх та управління. І найголовніша перспектива, це сприяння покращенню міської інфраструктури, оптимізації транспортних мереж, управлінню водними та енергетичними ресурсами тощо.

Література

1. Odum, H. T. Environmental Accounting, Energy and Environmental Decision Making. *John Wiley*, New York, NY, USA, 1996. 370 p.
2. Odum, H. T., Odum, E. P. The energetic basis for valuation of ecosystem services // *Ecosystems*. 2000. V. 3. P. 21–23.
3. Campbell, D. E., Meisch M., Demoss Th., Pomponio J., Bradley P. Keeping the book for environmental systems: an emergy analysis of West Virginia. *Environ. Monit. Assess*, V. 94. 2004. P. 217–230.