

Микола КОВАЛЬОВ, доцент кафедри загального землеробства, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, nicolaskov80@gmail.com, Центральноукраїнський національний технічний університет

КОМПАКТНА ГІДРОПОНІКА ЯК ЕЛЕМЕНТ “ЗЕЛЕНОЇ” ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДОВОЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ

Виклад основних матеріалів досліджень. Проведені нами дослідження показали, що глобальні виклики продовольчої безпеки та кліматичні зміни вимагають фундаментального переосмислення підходів до агровиробництва. Компактні гідропонні модулі як елемент “зеленої” енергетики та сталого розвитку відкривають нові можливості для декарбонізації продовольчих систем через локалізацію виробництва, інтеграцію відновлювальних джерел енергії та радикальне підвищення ресурсоефективності [10].

Системи освітлення становлять 60–75 % загального енергоспоживання компактних гідропонних модулів. Революційний перехід від традиційних натрієвих ламп високого тиску (HPS) до світлодіодних панелей забезпечує 74 % зниження енергоспоживання при еквівалентному або вищому фотосинтетичному потоці фотонів. Для типової домашньої системи площею 0,5 м² заміна HPS-лампи 250 Вт на LED-панель 65 Вт дає економію 2,9 кВт·год/добу або 1058 кВт·год/рік.

Питома енергоефективність сучасних LED-систем: споживання: 130 Вт/м² проти 500 Вт/м² для hps; ppf (photosynthetic photon flux): 2,7 μmol/j проти 1,7 μmol/j; тепловиділення: 50 Вт з 65 Вт споживання проти 210 Вт з 250 Вт; термін служби: 50 000 год проти 10 000 год; можливість точного налаштування спектру під різні фази росту.

При середньому тарифі \$0,12/кВт·год економія становить \$127/рік лише на освітленні однієї системи. В масштабах міста з 10 000 домашніх гідропонних модулів це еквівалентно 10,6 ГВт·год/рік економії або уникненню викиду 4770 т CO₂ (при середньому вуглецевому коефіцієнті енергосистеми 0,45 кг CO₂/кВт·год) [1].

Низьке енергоспоживання LED-систем створює унікальну можливість для автономного живлення від сонячних батарей [8]. Типовий компактний модуль споживає 80–120 Вт (освітлення + помпи + контролери), що відповідає продуктивності 2–3 стандартних сонячних панелей (400 Вт номінальної потужності кожна).

Техніко-економічні параметри гібридної системи: сонячна панель: 2×400 Вт (800 Вт пік) + акумулятор 5 кВт·год; середня генерація: 3,2 кВт·год/добу (при 4 години пік-інсоляції); покриття потреб: 65–80 % від потреби системи (залежно від сезону); вартість: \$1200 (панелі) + \$800 (акумулятор) = \$2000; термін окупності: 7 – 9 років при повному заміщенні мережевої енергії.

При частковій інтеграції сонячних панелей (50 % покриття) вуглецевий слід виробництва знижується з 0,95 кг CO₂-екв/кг до 0,48 кг CO₂-екв/кг, що на 40 % краще навіть за локальне традиційне господарство (0,80 кг CO₂-екв/кг). Повний перехід на відновлювальні джерела потенційно забезпечує кліматичну нейтральність виробництва овочів [8, 9]. Крім освітлення, значний потенціал економії енергії закладений у допоміжних системах (табл. 1)

Таблиця 1 – Енергоспоживання компонентів компактних гідропонних систем (традиційні та енергоефективні технології)

Компонент	Традиційна (Вт)	Енергоефективна (Вт)	Економія (%)	Економія (кВт·год/рік)
Освітлення (0,5 м ²)	250	65	74	1058
Циркуляційна помпа	35	8–15	57–77	153–196
Аератор	15	4	73	96
Вентилятор	12	3–8	33–75	29–65
Контролер + сенсори	2,5	0,8–1,5	40–68	6–12
Разом	314,5	80,8–93,5	70–74	1342–1427

Комплексна оптимізація дозволяє досягти 60–65% зниження загальних витрат на електроенергію, скорочуючи період окупності системи з 3–4 років до 1,5–2 років [1, 2]. Використання DC-помп з ШІМ-регулюванням, п'єзоелектричних аераторів та мікроконтролерів ESP32 з режимами глибокого сну (10–20 μA проти 40–60 mA у Arduino) забезпечує практично нульове споживання між вимірюваннями.

Водний стрес є одним з найкритичніших викликів сталого розвитку аграрної сфери. Сільське господарство споживає 70 % світових запасів прісної води, при цьому ефективність традиційного ґрунтового землеробства становить лише 30–50 % (решта втрачається через випаровування та фільтрацію) [1].

Кількісні показники економії води в гідропонних системах:

- 1) Листові культури (салат, шпинат, базилік): 8–12 л/кг проти 250–320 л/кг – економія 96–97 %;
- 2) Плодові культури (томати, огірки, перець): 22–28 л/кг проти 160–195 л/кг – економія 86 %;
- 3) Замкнутий цикл циркуляції: 90–95 % ефективність водокористування;
- 4) Відсутність втрат на глибинну фільтрацію та поверхневий стік;
- 5) Можливість використання дощової води та частково очищених стічних вод.

Для типового міського домогосподарства з гідропонним модулем, що виробляє 30 кг салату/рік, економія води становить 7260 літрів/рік порівняно з еквівалентним польовим виробництвом. В масштабах міста з 10000 модулів це 72,6 млн літрів/рік – еквівалент водоспоживання 400 міських жителів [1, 8].

Компактні гідропонні модулі, розміщені безпосередньо у житлових приміщеннях, повністю усувають транспортну складову вуглецевого сліду [3]. Традиційна продовольча система характеризується значними викидами від транспортування (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз вуглецевого сліду виробництва салату-латуку в різних системах культивування (кг CO₂-екв/кг продукції)

Система виробництва	Вуглецевий слід (кг CO ₂ -екв/кг)	Економія проти імпорту (%)
Імпорт (1500+ км)	1,93	–
Теплиці з газовим обігрівом	2,30	-19
Локальне традиційне (<100 км)	0,80	+59
Домашня гідропоніка (мережа)	0,95	+51
Домашня гідропоніка (50 % сонячна)	0,48	+75

Домашня гідропоніка забезпечує 51 % зниження викидів порівняно з імпортними овочами навіть при живленні від електромережі [3]. При частковій інтеграції сонячних панелей (50 %) вуглецевий слід знижується до 0,48 кг CO₂-екв/кг – на 40 % краще навіть за локальне традиційне господарство [4]. Додатковим екологічним ефектом є повне усунення втрат продукції (15–30 % у традиційних ланцюгах поставок) та відсутність необхідності холодильного зберігання.

Масове впровадження компактних гідропонних модулів у містах може стати ключовим елементом стратегії досягнення кліматичної нейтральності міських агломерацій [3, 6, 7].

Кліматичний вплив на рівні міста (приклад: 1 млн жителів):

- 1) Потенційне охоплення: 10 % домогосподарств (40 000 модулів);
- 2) Виробництво: 1200 т свіжих овочів/рік;
- 3) Економія електроенергії: 53,7 ГВт·год/рік (проти HPS-систем);
- 4) Уникнення викидів: 24165 т CO₂/рік (проти імпортової продукції);
- 5) Економія води: 290 млн літрів/рік;
- 6) Еквівалент: зняття з експлуатації 5 240 легкових автомобілів.

Інтеграція з розумними будинками (використання вторинного тепла, очищених стічних вод) та локальними розподіленими енергомережами (peer-to-peer торгівля сонячною енергією) посилює синергетичний ефект [6]. Формування міських продовольчих мереж, де домашні виробники обмінюються надлишками врожаю, створює нову парадигму децентралізованої продовольчої безпеки з мінімальним вуглецевим слідом [7].

Висновки:

1. LED-технології забезпечують 74 % економію енергії на освітленні з можливістю автономного живлення від 2–3 сонячних панелей, що створює передумови для повної енергонезалежності гідропонних модулів [1, 5, 8].

2. Комплексна оптимізація всіх підсистем дозволяє знизити загальне енергоспоживання на 60–65 %, що забезпечує скорочення періоду окупності до 1,5–2 років та робить технологію економічно доступною [1, 2].

3. Економія води 90–95 % (до 30–40 разів для листових культур) позиціонує гідропонні модулі як критично важливий інструмент подолання водного стресу в умовах кліматичних змін [1, 8].

4. Скорочення вуглецевого сліду на 51–75 % (залежно від джерела енергії) та повне усунення транспортної складової робить домашню гідропоніку реальним механізмом декарбонізації продовольчих систем [3].

5. Масштабування технології в урбаністичному середовищі має потенціал суттєвого внеску у досягнення кліматичної нейтральності мегаполісів через формування розподіленої «зеленої» агроенергетики [3, 6, 7].

Бібліографічний список

1. Pomoni D., Koukou M., Vrachopoulos M., Vasiliadis L. A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*. 2023. T. 16, № 4. 1690. DOI: 10.3390/en16041690
2. Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y., Ramasamy S., Khin M. C., Amaladoss A., Kadamb Haribhai P. Hydroponics: Current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 2023. T. 19, № 9. P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925
3. Samir S., Aboulmaga M. Towards sustainable and regenerative cities: Vertical farming as a solution for achieving zero-carbon cities and climate neutrality: A case study of a Mediterranean city. В кн.: Sayigh A., Trombadore A., Calcagno G. (ред.) *Getting to Zero – Beyond Energy Transition Towards Carbon-Neutral Mediterranean Cities*. Innovative Renewable Energy. Cham: Springer, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-82323-7_10
4. Kabir M. S. N., Reza M. N., Chowdhury M., Ali M., Samsuzzaman, Ali M. R., Lee K. Y., Chung S.-O. Technological trends and engineering issues on vertical farms: A review. *Horticulturae*. 2023. T. 9, № 11. 1229. DOI: 10.3390/horticulturae9111229
5. Farvardin M., Taki M., Gorjian S., Shabani E., Sosa-Savedra J. C. Assessing the physical and environmental aspects of greenhouse cultivation: A comprehensive review of conventional and hydroponic methods. *Sustainability*. 2024. T. 16, № 2. 1273. DOI: 10.3390/su16021273
6. Gunapala R., Gangahagedara R., Wanasinghe W. C. S., Samaraweera A. U., Gamage A., Rathnayaka R., Hameed Z., Baki Z. A., Madhujith T., Merah O. Urban agriculture: A strategic pathway to building resilience and food security in cities. *Farming Systems*. 2025. T. 3, № 1. 100150. DOI: 10.1016/j.farsys.2025.100150
7. Zaręba A., Krzemińska A., Kozik R. Multifunctional vertical farming systems as a basis for transforming urban food systems amid climate change. *Sustainability*. 2025. T. 17, № 19. 8668. DOI: 10.3390/su17198668
8. Abdelhamid M. A., Baraka S. M., Ali K. A. M., Zhang Z., Hendy Z. M. Sustainable hydroponic production using solar energy and treated greywater within the water-energy-food-environment nexus. *Scientific Reports*. 2025. T. 15. 31200. DOI: 10.1038/s41598-025-16030-4
9. Kovalov Mykola, Iryna Sokolovska and Yurii Mashchenko, 2025. Impact of plant determinacy and grafting methods on productivity in tomato hybrids. *J. Appl. Hortic.*, 27(4): 721–727. DOI: <https://doi.org/10.37855/jah.2025.v27i04.126>
10. Пат. UA 161674 U Україна, МПК (2025.01) A01G 31/00. Портативна гідропонна установка / Ковальов М. М., Васильковська К. В., Михайлова Д., Васильковський О. М.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. № u2025 02061; заявл. 02.05.2025; опубл. 24.12.2025, Бюл. № 52. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891980>