

БУРЛАКА СЕРГІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>e-mail: ipserhiy@gmail.com**ЛУЦ ПАВЛО**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>e-mail: luts@vsau.vin.ua**КУПЧУК ІГОР**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2973-6914>e-mail: kupchuk.igor@i.ua**ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГОВИТРАТ У ГІДРОПОНІЦІ**

Гідропоніка, як сучасна альтернативна система вирощування рослин, набуває все більшого значення у сільському господарстві, особливо в умовах обмеженості ресурсів та зміни кліматичних умов. Ця стаття присвячена оцінці продуктивності та енерговитрат у гідропонічних системах з метою виявлення ключових аспектів їх ефективності та ресурсозбереження.

Ключові слова: гідропоніка, енергоефективність, продуктивність, штучне освітлення, теплиця, вирощування рослин, вегетація, фотосинтез, живлення.

BURLAKA SERHIY, LYTS PAVLO, KUPCHUK IHOR
Vinnytsia National Agrarian University

EVALUATION OF PRODUCTIVITY AND ENERGY CONSUMPTION IN HYDROPONICS

Hydroponics, as a modern alternative plant cultivation system, is gaining increasing significance in agriculture, especially under conditions of resource limitations and changing climatic conditions. This article is dedicated to evaluating the productivity and energy consumption in hydroponic systems to identify key aspects of their efficiency and resource conservation.

The study analyzes the productivity of a hydroponic system based on real operational data. It examines the impact of parameters such as energy consumption for artificial lighting, water usage, and nutrient costs. Specifically, it explores options for reducing energy consumption through the optimization of lighting regimes and the use of energy-efficient technologies. A study comparing the yield of THP and HA showed that spinach grown under THP had a significantly higher yield in summer. Arable land, freshwater resources, and natural resources are limited or unevenly distributed among different regions and countries. These resources are essential for various sectors, including food and energy production. Therefore, regardless of economic motivations, food importation appears inevitable to meet the needs of countries with significant resource deficits.

The term "virtual water" refers to the water required for the production of goods. Changes in consumption patterns, lifestyles, and demographics, particularly in developed countries, increase pressure on global water and energy resources through food imports and virtual water trade. For instance, while virtual water import might seem beneficial for water-scarce regions, empirical data indicate that this trade often occurs from regions with water and land deficits to regions rich in water but lacking in land.

Keywords hydroponics, energy efficiency, productivity, artificial lighting, greenhouse, growing plants, vegetation, photosynthesis, nutrition.

Постановка проблеми

Міжнародна торгівля продовольством значно впливає на глобальне землекористування. Наприклад, те, що споживають в Україні, впливає не тільки на їх власне середовище, але й на ресурси та життя людей за межами країни. Виробництво продовольства майже на 98% залежить від ґрунту, який є обмеженим ресурсом. Деградація, ерозія, засолення та забруднення ґрунтів через інтенсивне сільське господарство можуть обмежити глобальне сільськогосподарське виробництво у найближчі десятиліття.

Орні землі займають приблизно 12% площі у світі. Проте перетворення водно-болотних угідь і лісів на орні землі загрожує екосистемами, необхідних для життя людини та виробництва продуктів харчування. Вони утримують воду під час сильних опадів і виділяють її в посушливі періоди, очищаючи від забруднювачів, а ліси зменшують ерозію. Крім того, перетворення природних середовищ існування на сільськогосподарські угіддя збільшує темпи втрати біорізноманіття.

Традиційне сільське господарство вимагає значних ресурсів, включаючи придатну для обробки землю, воду та добрива. Що стосується загальної кількості води на Землі, лише 3% становить прісна вода, тоді як тільки 0,5% доступно для використання, причому майже 70% з цієї кількості витрачається на сільське господарство. Сучасні сільськогосподарські практики часто марнують та забруднюють наші обмежені водні ресурси, тому необхідно відповідально використовувати прісну воду в аграрному секторі. У міру зростання світового населення і збільшення екстремальних погодних умов, традиційне сільське господарство стає менш ефективним у задоволенні зростаючих продовольчих потреб. Сільське господарство з контролем середовищем (СГКС) є технологічним методом, що дозволяє отримувати екологічно чисті та високоякісні сільськогосподарські культури. СГКС може зменшити сільськогосподарські відходи та збільшити виробництво. На відміну від традиційного сільського господарства, СГКС можна

використовувати в будь-яких умовах, усуваючи такі ризики, як вилуговування поживних речовин, ерозія та екстремальні температури. Системи з контролем температури та додатковим освітленням можуть забезпечувати продовольством цілий рік, незалежно від зовнішніх умов. Дослідження показали, що виробництво гідропонних культур забезпечує приблизно в 11 разів більшу врожайність і вимагає в 13 разів менше води порівняно з традиційним землеробством. Використання пестицидів у СГКС зменшується або взагалі не потрібне.

У СГКС сільськогосподарські культури вирощуються методом гідропоніки, що передбачає використання безгрунтових субстратів, які регулярно забезпечуються розчином добрив або повністю занурюються у розчин прісної води з необхідними поживними речовинами та розчиненим киснем. Листову зелень, зокрема салат, зазвичай вирощують у розчинній культурі. Гідропоніка дозволяє отримувати овочі вищої якості та сприяє зменшенню відходів і забруднення навколишнього середовища порівняно з традиційним вирощуванням. Однак гідропоніка вимагає значно більше енергії для виробництва врожаю. Основна частина енергетичних потреб у гідропонних системах пов'язана з додатковим освітленням взимку, охолодженням, опаленням і водяними насосами. Великі витрати на обладнання вимагають значних початкових інвестицій, що може бути складно для багатьох фермерів. Крім того, не всі культури економічно вигідно вирощувати гідропонним методом. Дешеві масові культури, такі як кукурудза та соя, не є рентабельними в гідропонних системах. Через високі енергетичні потреби та великі витрати на обладнання гідропоніка рекомендується для вирощування високоцінних культур.

Аналіз останніх джерел

Аргументи проти нововведень, таких як гідропоніка, часто виникають, коли культура успішно вирощується традиційними методами у відкритому ґрунті. Лагерберг Фогельберг (2013) зазначив, що салат айсберг вирощується у відкритому ґрунті в Швеції, але самодостатність Швеції щодо вирощування салату на відкритому повітрі взимку дорівнює нулю.

Barbosa та інші порівняли гідропонне виробництво салату з традиційним методом у Арізоні, США, з точки зору води, врожайності та енергоспоживання, щоб перевірити, чи є гідропоніка більш стійкою. За їхніми даними, врожайність гідропонного салату була приблизно в 11 разів вищою на одиницю площі, споживала в 13 разів менше води на кілограм салату, але потребувала в 82 рази більше енергії на кілограм порівняно з традиційними методами. Проте місцеві умови для вирощування салату в Арізоні значно відрізняються від шведських, наприклад, за середньомісячною температурою і сонячним світлом.

Завдяки зменшенню проблем зі шкідниками, постійній подачі поживних речовин до коріння та використанню штучного освітлення для подовження світлового дня, продуктивність гідропонних систем зазвичай висока. Однак повідомлені врожаї гідропонних систем є непостійними. Тому визначення врожайності гідропонного виробництва різних сільськогосподарських культур на основі існуючих польових досліджень та літератури є складним завданням.

Barbosa з командою також стандартизували дані, зібрані з літературних оглядів та програм Корнельського університету, Університету штату Огайо та Університету Кентуккі, які включали інформацію щодо врожайності та площі виробництва. Вони наблизилися до безперервного цілорічного виробництва салату методом гідропоніки з використанням штучного освітлення та температурного контролю. Результати показали врожайність 24 качанів салату на квадратний метр гідропонної теплиці за один цикл (12 врожаїв на рік) із середньою свіжою масою 144,6 г на рослину, що становить приблизно 288 головок/м² на рік або 41 кг/м² на рік.

В іншому дослідженні, проведеному Сомервіллем (2017), було створено дві низькотехнологічні гідропонні системи в Секторі Газа на площі 150 м² (130 м² площі посадки) для кожної системи. Результати були подібні до результатів Barbosa та ін. (2015) з точки зору використання води та річного виробництва салату на квадратний метр порівняно зі звичайним вирощуванням. За даними однієї з цих систем, за один цикл на 150 м² можна виростити 3600 качанів салату, причому за рік складається 11 циклів. Це означає можливе щорічне виробництво 264 голівок/м².

Подібним чином, Фернандес (2017) розробив невелику гідропонну теплицю для дослідження продуктивності за оптимальними алгоритмами контролю росту. Вісім рослин могли б рости в теплиці з виробничою площею близько 0,3 м² за один цикл (тобто 25 рослин на квадратний метр, якщо систему розширити), з оптимальним часом збору врожаю на 25-й день після посадки. Хоча кількість можливих циклів у році не вказувалася, враховуючи максимальний прибутковий день збору врожаю (25-й день), якщо врахувати 12 врожаїв на рік, річний урожай їхньої системи складе приблизно 300 голівок/м².

Метою роботи є оцінка продуктивності та енерговитрат у гідропонічних системах, визначення ключових аспектів їх ефективності та можливостей для збереження ресурсів. Дослідження спрямоване на аналіз впливу параметрів, таких як споживання електроенергії на штучне освітлення, водоспоживання та витрати на поживні речовини, а також розробку рекомендацій щодо зменшення енерговитрат шляхом оптимізації режимів освітлення та впровадження енергоефективних технологій.

Виклад основного матеріалу

У гідропонному землеробстві використовуються різні виробничі системи, але серед науковців і виробників немає одностайної думки щодо найпродуктивніших методів. Дві найпопулярніші системи – це техніка живильної плівки (ТЖП) і техніка глибокого потоку (ТГП), також відома як глибоководна культура (ГК). ТЖП характеризується тонкою плівкою води, яка проходить через канал, де коріння рослин частково

занурене в воду і піддається впливу повітря. У промислових масштабах ця система представлена вузькими каналами, де рослини вирощуються рядами довжиною 3-6 метрів.

ТГП, або ГК, забезпечує більші об'єми поживного розчину для коренів рослин, що можуть варіюватися від кількох сантиметрів до більше метра. Основна відмінність між ТЖП та ГК полягає в об'ємі поживного розчину, якому піддаються рослини: у ГК розчин охоплює більшу площу коренів, ніж у ТЖП.

Дослідження, що порівнювало врожайність ТЖП і ГК, показало, що шпинат, вирощений за ТЖП, має значно більшу врожайність влітку. Крім ТЖП і ГК, існує система столів затоплення, яка використовує 8-15 см живильного розчину. У цій системі рослини ростуть у воді глибиною 5-8 см, де коріння повністю занурені в живильний розчин. Перевагами цієї системи є менша кількість поживного розчину, легке обслуговування рівня розчиненого кисню та нижчі витрати на нагрівання розчину.

Нещодавнє дослідження, яке порівнювало ТЖП та ГК в аквапоніці, показало, що ГК перевершує ТЖП за врожайністю салату. Інше дослідження щодо врожайності базилика показало, що ТГП, де рослини росли у 15 см води, давало дещо вищий урожай, ніж ТЖП з 1 см плівки живильного розчину, хоча різниця не була значною.

Поточні дослідження не дають однозначної відповіді щодо найкращих систем для вирощування гідропонного салату. Відомо, що різні сорти салату можуть віддавати перевагу певним системам виробництва. У комерційних гідропонних теплицях, де вирощується кілька сортів салату, оптимізація системи для кожного сорту може підвищити загальну продуктивність. Спостереження за перевагами різних сортів у конкретних системах може надати цінну інформацію для виробників щодо оптимізації їхніх гідропонних систем.

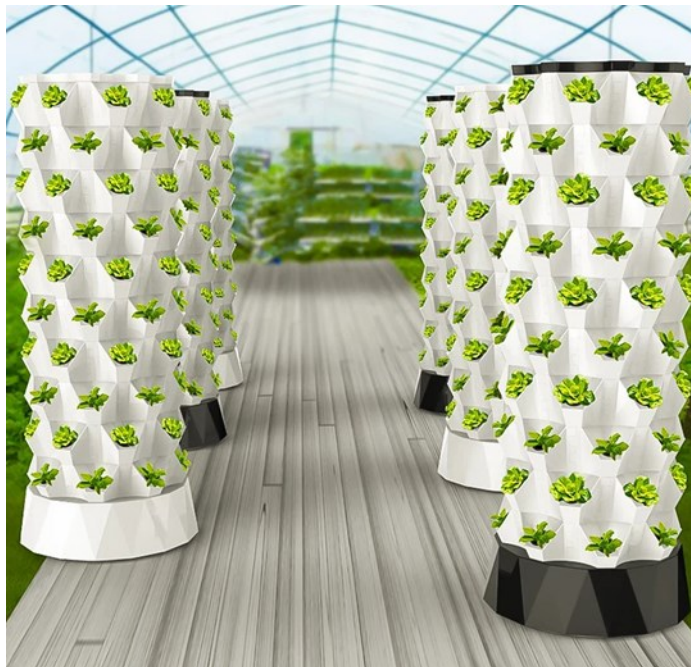


Рис. 1. Водоциркулююча гідропонна система вирощування

Гідропоніка може стати доповненням до традиційних методів землеробства в ґрунті.

Однак проблеми, пов'язані з гідропонним землеробством і можливістю для зменшення залежності від імпорту продовольства та скорочення дистанції між виробниками та споживачами в Україні, вивчено недостатньо. Крім того, національна продовольча стратегія уряду має на меті збільшити виробництво та самозабезпечення продовольством, а також зменшити вразливість ланцюгів постачання продовольства у країні. Тому необхідно дослідити виклики, можливості та наслідки використання гіпотетичної гідропонної системи для вирощування салату в міських районах, щоб зменшити імпорт та стимулювати місцеве виробництво. До конкретних цілей належать:

- Оцінка можливостей і потенційних проблем, пов'язаних із гідропонними системами загалом та виробництвом.
- Оцінка потреб у ресурсах, таких як енергія та земля, для створення гіпотетичної гідропонної системи.
- Оцінка існуючих потужностей з виробництва салату (включаючи традиційні методи), обсягів імпорту, місцезнаходження та рівня самозабезпечення порівняно з потужностями гіпотетичної гідропонної системи.

Гідропонні системи можна класифікувати за кількома ознаками. Один із підходів розділяє їх на дві основні категорії:

- Закриті системи, в яких поживні розчини постійно переробляються, контролюються та коригуються.
- Відкриті системи, в яких поживні розчини використовуються одноразово та викидаються після

кожного циклу живлення.

Різноманітні культури, від листових овочів до огірків і помідорів, можна вирощувати гідропонним методом, використовуючи різні техніки. Це часто вигідно, оскільки листові овочі, такі як салат, добре ростуть на гідропонії, а висока густина рослин, як у випадку з помідорами, призводить до більших врожаїв.

Дослідники зазначають, що з огляду на переваги та недоліки кожної системи для короткострокових культур, таких як салат, техніка живильної плівки (ТЖП), яка належить до закритих гідропонних систем, є частим вибором. Однак ця система вимагає постійного контролю за потоком розчину.

Загалом, енерговитрати гідропонних систем головним чином залежать від штучного освітлення, опалення/охолодження внутрішніх приміщень, вентиляції та відкачування води. Дослідження показали, що салат є основною культурою для вирощування на гідропонії у всьому світі. Проте, мало уваги приділено тому, що салат є рослиною холодного сезону.

Оптимальна температура для росту салату вдень варіюється від 18 до 25 °С, а вночі від 10 до 15 °С. Якщо розглядати нічний період як 8 годин і решту як денний, середня оптимальна температура для росту салату за 24 години становить від 15 °С до 22 °С.

Таким чином, використання теплової або охолоджувальної енергії для таких систем у міських районах може не значно відрізнятись від енергоспоживання домогосподарств у цих районах для аналогічних цілей.

Таблиця 1

Середньомісячна температура у місті Вінниця

Середня Температура, а, (°С)	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
	-3	-3	0	4	11	18
	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
24	25	16	6	1	-3	

Важливим етапом в гідропонній системі є забезпечення освітлення для фотосинтезу. Для внутрішніх систем, які не отримують достатньо сонячного світла, основним варіантом є використання штучного освітлення. Синє, зелене та червоне світло є ключовими кольорами для позитивного впливу на врожайність та якість рослин. Світлодіодні лампи (LED), особливо сині та червоні, є найефективнішими для вирощування, оскільки вони енергоефективніші та фотосинтетично активніші.

Фотосинтетично активне випромінювання (PAR) визначається як частина електромагнітного випромінювання, яке може використовуватися для фотосинтезу зеленими рослинами. Такий тип випромінювання оцінюється через щільність потоку фотосинтетичних фотонів (PPFD). Рекомендований рівень PAR у 17 моль/м² на день для оптимального зростання салату при комбінації природного та штучного освітлення.

Різноманітність PPFD, співвідношення червоного до синього (R) світла та фотоперіоди впливають на ріст салату та процес фотосинтезу. Для досягнення очікуваного врожаю у гідропонній системі важливо враховувати необхідний рівень DLI (денна інтегральна інсоляція), який є сумою PAR, отриманого рослиною протягом дня.

Отже, у зв'язку з тим, що вихід продукції гідропонної системи залежить від умов освітлення, важливо визначити оптимальний DLI для комерційного вирощування якісних овочів і зелені.

Таблиця 2

Довжина хвилі різних джерел світла

Колір	Довжини хвиль (нм)
Фіолетовий	380-430
Синій	430-500
Блакитний	500-520
Зелений	520-565
Жовтий	565-580
Оранжевий	580-625
Червоний	625-740

Наприклад, для середньостатистичної теплиці (табл. 3) продуктивність та енергоефективність суттєво залежить від методів та способів освітлення.

Таблиця 3

Параметри теплиці для вирощування салату

Параметр	Значення
Площа теплиці	1000 м ²
Виробнича площа (площа посадки)	800 м ²
Температура в середньому за рік	12°С
Середньорічна вологість повітря	70%
Середньорічне освітлення (год/день)	5 годин
Використання штучного освітлення	14 годин на день
Коефіцієнт використання світлодіодів	1.8 м ² /Вт
Споживання електроенергії	120 кВт·год/м ² на рік

Табл. 4 з даними помісячного споживання електроенергії для гідропонічної теплиці вказує на значне споживання електроенергії, зумовлене освітленням рослин протягом року. Основні параметри, що впливають на це споживання, включають тривалість штучного освітлення, яка становить 14 годин на день, та використання світлодіодів з коефіцієнтом використання 1.8 м²/Вт.

Таблиця 4

Середньомісячні витрати на електроенергію

Місяць	Штучне освітлення (годин)	Споживання електроенергії (кВт·год)
Січень	434	52000
Лютий	392	47040
Березень	434	52080
Квітень	413	49560
Травень	434	52080
Червень	413	49560
Липень	434	52080
Серпень	434	52080
Вересень	413	49560
Жовтень	434	52080
Листопад	413	49560
Грудень	434	52080

Споживання електроенергії в гідропонічній теплиці значно варіюється в залежності від місяця року, проте загалом залишається на високому рівні протягом всього року. Освітлення є одним із основних факторів, що впливають на енерговитрати в гідропонічній теплиці, особливо при використанні штучного світла. Для зниження споживання електроенергії можна розглядати впровадження більш енергоефективних технологій освітлення та оптимізацію режимів роботи освітлювальних систем відповідно до фізіологічних потреб рослин.

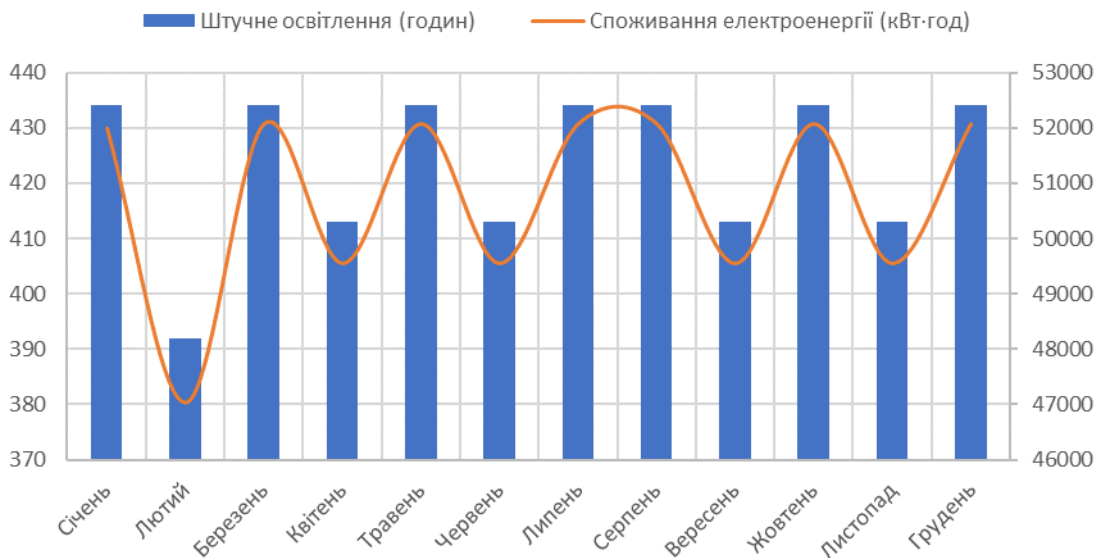


Рис. 2. Споживання електроенергії в гідропонічній теплиці впродовж року

Відсоткова різниця споживання електроенергії між максимальним і мінімальним місяцями становить приблизно 10.72%. В деяких місяцях може бути більше рослин, які вимагають більше світла, що призводить до збільшеного споживання електроенергії.

Довжина дня змінюється впродовж року, що може впливати на тривалість штучного освітлення. Наприклад, в зимові місяці може бути менше природного світла, тому потрібно більше штучного освітлення. Використання більш ефективних світлодіодів або оптимізація режимів освітлення може також вплинути на споживання електроенергії.

Висновки

У результаті проведеного дослідження, спрямованого на оцінку продуктивності та енерговитрат у гідропонічній системі, було отримано значущі висновки, які варто врахувати для покращення ефективності цієї технології в сільському господарстві.

Високий рівень продуктивності гідропонічних систем підтверджується результатами досліджень, зокрема високою урожайністю та якістю вирощуваних овочів. Підвищення урожайності в порівнянні з традиційними методами вирощування відкриває нові перспективи для сільськогосподарського сектора, забезпечуючи стабільність постачання продуктів на ринок у незалежності від кліматичних умов.

Однак важливою проблемою, яка потребує уваги, є енерговитрати гідропонічних систем. Аналіз споживання електроенергії показав значний внесок штучного освітлення у загальні енерговитрати. Для

зниження споживання електроенергії рекомендується використання енергоефективних технологій освітлення, оптимізація режимів та використання природного світла в максимально можливих межах.

Окрім того, варто звернути увагу на оптимальне використання ресурсів, таких як вода та поживні речовини, що є ключовими для підтримання стабільної ефективності гідропонічних систем. Налагодження циклічного використання води та раціональне дозування поживних речовин дозволяє зменшити витрати та підвищити економічну вигідність вирощування.

Загалом, гідропоніка продовжує відігравати важливу роль у сучасному сільському господарстві, проте для досягнення повного потенціалу цієї технології необхідно активно впроваджувати інноваційні рішення щодо зниження енерговитрат та оптимізації виробничих процесів.

Література

1. Imenda, S. Is there conceptual difference between conceptual and theoretical frameworks? *Journal of Social Science*, vol. 38(2), 2014. pp. 185-195.
2. Johansson, S. The Swedish foodprint - an agroecological study of food consumption. Department of ecology and crop production science. *Swedish University of Agricultural Sciences*, Uppsala. 2005.
3. Martin, M. & Molin, E. Environmental Assessment of an Urban Vertical Hydroponic Farming System in Sweden. *Sustainability, MDPI*, vol. 11(15), 2019. pp. 1-14.
4. Olle, M. & Alsina, I. Influence of wavelength of light on growth, yield and nutritional quality of greenhouse vegetables. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, vol. 73(1), 2019. pp.1-9.
5. Yaropud V., Aliiev E., Mazur I., Burlaka S. Simulating the process of operation of vortex layer electromagnetic apparatus with ferromagnetic working elements. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. № 9. P. 64–71.
6. Burlaka S., Boretska T., Kupchuk I. Directions and methods of modernization of the energy sector through the use of biofuels. *Agricultural engineering*. 2023. Vol. 55. P. 44-51.
7. Бабін І.А., Бурлака С.А., Холодюк О.В. Ефективність використання стрічкової сушарки. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2023. Т. 1. № 5 (325). С. 26-29.
8. Kupchuk I., Kravets R., Burlaka S., Dubrovina O. Theoretical research of process regularities of grinding structural-heterogeneous organic materials. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 12-19.
9. Веселовська Н.Р., Бурлака С.А. Методи та прийому комбінування робочих органів комплексних ґрунтообробних машин. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія Технічні науки*. 2023. №1 (317). С. 42–47.
10. Бурлака С.А., Борецька Т.Ю. Економічні аспекти та напрямки розвитку енергетичного сектору України. *Вісник Хмельницького національного університету Серія: Економічні науки*. 2022. №3. С. 7–14.
11. Яропуд В.М., Купчук І.М., Бурлака С.А. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів адаптивного тритрубного теплоутилізатора тваринницьких приміщень. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 142–149.

References

1. Imenda, S. Is there a conceptual difference between conceptual and theoretical frameworks? *Journal of Social Science*, vol. 38(2), 2014. pp. 185-195.
2. Johansson, S. The Swedish foodprint - an agroecological study of food consumption. Department of ecology and crop production science. *Swedish University of Agricultural Sciences*, Uppsala. 2005.
3. Martin, M. & Molin, E. Environmental Assessment of an Urban Vertical Hydroponic Farming System in Sweden. *Sustainability, MDPI*, vol. 11(15), 2019. pp. 1-14.
4. Olle, M. & Alsina, I. Influence of wavelength of light on growth, yield and nutritional quality of greenhouse vegetables. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, vol. 73(1), 2019. pp. 1-9.
5. Yaropud V., Aliyev E., Mazur I., Burlaka S. Simulating the process of operation of vortex layer electromagnetic apparatus with ferromagnetic working elements. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. No. 9. P. 64–71.
6. Burlaka S., Voretska T., Kupchuk I. Directions and methods of modernization of the energy sector through the use of biofuels. *Agricultural engineering*. 2023. Vol. 55. P. 44-51.
7. Babin I.A., Burlaka S.A., Kholodyuk O.V. The efficiency of using a belt dryer. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: technical sciences*. 2023. Vol. 1. No. 5 (325). P. 26-29.
8. Kupchuk I., Kravets R., Burlaka S., Dubrovina O. Theoretical research of process regularities of grinding structural-heterogeneous organic materials. *Vibrations in engineering and technology*. 2023. No. 2 (109). P. 12-19.
9. Veselovska N.R., Burlaka S.A. Methods and methods of combining working bodies of complex tillage machines. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series Technical sciences*. 2023. No. 1 (317). P. 42–47.
10. Burlaka S.A., Boretska T.Yu. Economic aspects and directions of development of the energy sector of Ukraine. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University Series: Economic Sciences*. 2022. No. 3. pp. 7–14.
11. Yaropud V.M., Kupchuk I.M., Burlaka S.A. Justification of the structural and technological parameters of the adaptive three-pipe heat exchanger of livestock premises. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. 2022. No. 1 (116). P. 142–149.