

Дубовкіна І.О.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Мирончук А.О.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ЗАСТОСУВАННЯ ЗНАКОЗМІННИХ ІМПУЛЬСІВ ТИСКУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГІДРОПОННОГО ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН

У зв'язку зі зростанням потреби в ефективному використанні водних ресурсів у сільському господарстві, питання підвищення врожайності у гідропонних системах набуває особливої актуальності. Дослідження присвячене впровадженню інноваційного методу оброблення живильних розчинів знакозмінними імпульсами тиску, що дозволяє оптимізувати процеси тепломасообміну та покращити фізико-хімічні властивості середовищ для вирощування рослин.

У дослідженні використано роторно-пульсаційний апарат для одержання живильних розчинів при різних параметрах тиску, частоти та часу оброблення. Проведено тестування росту рослин пшениці сорту «Альбіна» та овес сорту «Чернігівський 28» в умовах закритого ґрунту, а також дослідження для аналізу мікрофлори середовища до та після оброблення шляхом оптичної мікроскопії. В роботі використані статистичні методи обробки даних з визначенням середніх значень і стандартного відхилення.

У результаті проведених досліджень встановлено, що застосування знакозмінних імпульсів тиску при обробленні живильних розчинів сприяє суттєвому покращенню агробіологічних показників. Висота рослин збільшується на 20,5–22,7%, що свідчить про активацію ростових процесів. Врожайність підвищується на 32,8–34%, що вказує на підвищення ефективності використання поживних речовин. Спостерігається також зростання маси рослинного мату та підвищення коефіцієнта росту, що характеризує загальне посилення біомасоутворення. Біологічний аналіз підтверджує формування сприятливої мікрофлори у середовищі після оброблення, що створює здорове мікробіологічне середовище для розвитку культур. Технологія демонструє потенціал до зменшення витрат води та мінеральних добрив, що є важливим чинником сталого та ресурсозберігаючого агровиробництва.

Практична цінність дослідження полягає в розробці ефективного методу інтенсифікації вирощування культур в умовах закритого ґрунту із застосуванням гідропонного методу вирощування, що сприяє підвищенню врожайності та продовольчій безпеці.

Ключові слова: гідропоніка, знакозмінні імпульси тиску, роторно-пульсаційний апарат, живильний розчин, врожайність, тепломасообмін, мікрофлора, продуктивність рослин.

Постановка проблеми. У світовому сільському господарстві зростає інтерес до гідропоніки як ефективної альтернативи традиційному землеробству, що дозволяє вирощувати культури в умовах обмежених природних ресурсів, зокрема води та родючих ґрунтів. Успішне впровадження гідропонних систем залежить передусім від якості та стабільності живильного середовища, яке має забезпечувати рослини усіма необхідними макро- і мікроелементами. При цьому традиційні методи оброблення живильних розчинів не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, достатню біологічну активність середовища та оптимальні умови для кореневої системи.

У сучасних дослідженнях доведено, що фізичні методи впливу на рідинні середовища

можуть змінювати їхні фізико-хімічні характеристики та сприяти інтенсифікації масопереносних процесів. Зокрема, метод знакозмінних імпульсів тиску поєднує низку гідродинамічних ефектів (кавітація, зсув, імпульсне прискорення), які можуть бути використані для покращення структури живильних розчинів. Проте на сьогодні недостатньо досліджено вплив такого підходу на агробіологічні показники рослин у гідропонних умовах, що зумовлює потребу у проведенні цілеспрямованих наукових досліджень.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розроблення та експериментальна перевірка ефективного методу оброблення живильних розчинів, який би сприяв підвищенню продуктивності рослин, покращенню їх

морфометричних характеристик та формуванню сприятливого мікробного середовища при вирощуванні у гідропонних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У контексті зростаючої актуальності проблеми ефективного вирощування рослин у гідропонних умовах, наукова спільнота зосереджує увагу на вдосконаленні складу живильних розчинів, створенні автоматизованих систем керування агротехнічними параметрами та пошуку енергоефективних технологій обробки середовища вирощування. У цьому напрямі проведено низку ґрунтовних досліджень як в Україні, так і за її межами.

Зокрема, у роботі Кумар В. та ін. відзначається тенденція глобального поширення гідропоніки як відповіддю на виклики змін клімату, нестачу води та родючих ґрунтів. Автори підкреслюють важливість створення простих у використанні, автоматизованих гідропонних систем із низькими експлуатаційними витратами, що здатні функціонувати з мінімальним втручанням людини [7, с. 291].

У публікації Реджесер Г. розглядаються можливості впровадження смарт-технологій, таких як сенсорні мережі, штучний інтелект і автоматизоване керування у гідропонному виробництві. Такі підходи забезпечують підвищення точності моніторингу параметрів живильного середовища, а також дають змогу мінімізувати втрати води й добрив [8, с. 925].

Окрему увагу слід звернути на дослідження Хашізуме Т, Такакі К., які аналізують вплив імпульсних електричних полів та часомодульованої плазми на ріст рослин і мікробіологічну активність, що дає підстави припустити, що подібні фізичні методи, зокрема й знакозмінні імпульси тиску, можуть мати істотний ефект у гідропонних умовах [6, с. 59].

У роботі Ванг С., Рагван В. доведено, що біологічна модифікація середовища (додавання компосту, збагаченого бактеріями *Bacillus safensis*) позитивно впливає на ріст салату, покращуючи структуру мікробіоти. Це вказує на ключову роль мікрофлори у створенні стабільного середовища вирощування [11].

Також важливим є соціально-економічний аспект гідропоніки, розкритий у публікації Рамос М. Автори досліджують бар'єри впровадження цифрових гідропонних систем в міських агроініціативах та наголошують на необхідності адаптації технологій до потреб локальних спільнот [9].

Хоча наявні дослідження висвітлюють широкий спектр підходів до оптимізації гідропонних систем, залишається низка невирішених аспектів, зокрема: відсутність достатньо досліджених фізичних методів обробки живильних розчинів, що мають вплив на фізико-хімічні властивості середовища на мікро- та нанорівнях, недостатньо вивчені гідродинамічні ефекти в гідропоніці, зокрема дія знакозмінних імпульсів тиску, обмеженість досліджень щодо мікробіологічної стабільності середовищ після обробки фізичними методами, брак експериментів, які поєднують енергофізичний вплив із біологічними наслідками для культур у гідропонних умовах.

Таким чином, проведене дослідження започатковує важливу прогалину в науковій літературі, запропонувавши новий підхід до підвищення ефективності гідропонного вирощування на основі дії знакозмінних імпульсів тиску, що, в свою чергу, створює основу для подальших міждисциплінарних розробок на перетині агрофізики, мікробіології та автоматизації.

Постановка завдання. Метою статті є оцінка ефективності застосування знакозмінних імпульсів тиску в гідропонних умовах та їх вплив на зростання та продуктивність рослин. Завдання дослідження полягає у проведенні експериментального оброблення живильних розчинів знакозмінними імпульсами тиску та дослідження впливу оброблених розчинів на зростання та врожайність вибраних культур.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилося з метою оцінки впливу знакозмінних імпульсів тиску на властивості живильних розчинів та ефективність гідропонного вирощування сільськогосподарських культур. Методологія базувалася на застосуванні роторно-пульсаційного апарату (РПА), що створював знакозмінні імпульси тиску в рідкому середовищі. Об'єктами дослідження були живильні розчини та рослини пшениці сорту «Альбіна» і овес сорту «Чернігівський 28».

У дослідженні обрано культури пшениці сорту «Альбіна» та вівса «Чернігівський 28» з огляду на їхню поширеність і чутливість до змін у живильному середовищі. Використовувалися три типи розчинів: дистильована вода, вода для крапельного зрошення та мінералізований живильний розчин.

Обробку рідин здійснювали у роторно-пульсаційному апараті за такими параметрами: тривалість 5–600 с, частота імпульсів 1–5 Гц, кутова швидкість 300–315 с⁻¹, тиск 370–390 кПа [3, с. 43].

Рослини вирощували в лабораторній гідропонній установці при температурі 21–23 °С, освітленні 800–1000 лк/м², з аерозольним поливом кожні 6–10 хвилин. Спостереження тривали 5–8 днів. Проводили вимірювання висоти рослин, маси мату, врожайності та коефіцієнта росту.

Для мікробіологічного аналізу використовували оптичну мікроскопію (Carl Zeiss Axio Imager Vario II, збільшення $\times 640$), визначаючи видовий склад і чисельність мікроорганізмів до і після вирощування. Обробку даних здійснювали у Microsoft Excel 2010 з розрахунком середніх значень і стандартного відхилення, що дозволило встановити статистичну достовірність результатів [10, с. 171].

Експериментальні дослідження проводилися на дослідній установці, зображеній на рис. 1 [4, с. 45].

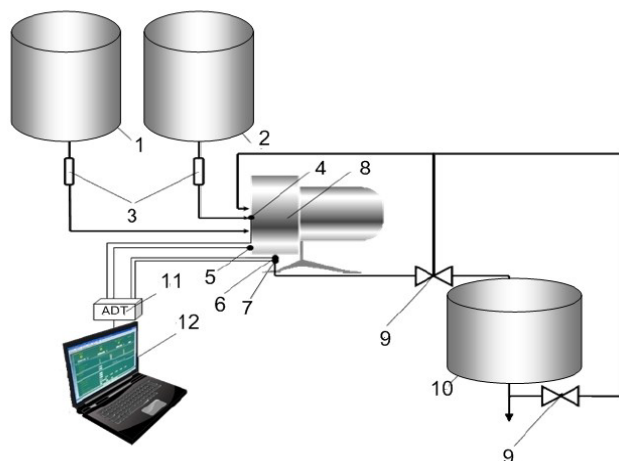


Рис. 1. Схема експериментальної установки:
1 – бак для рідини; 2 – бак для поживних речовин;
3 – витратомір; 4, 6 – датчики температури;
5, 7 – датчики тиску; 8 – роторно-пульсаційний апарат (РПА); 9 – клапан; 10 – бак для обробленого розчину; 11 – аналогово-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер

Основним елементом експериментальної установки є роторно-пульсаційний апарат (8), який виступає об'єктом дослідження. У цьому апараті здійснюється оброблення рідких розчинів та живильних середовищ знакозмінними імпульсами тиску, що створюються завдяки гідродинамічним ефектам: швидкостям зсуву потоку, напруженням зсуву, кутовим швидкостям обертання, миттєвій зміні тиску.

Вихідна рідина (водні розчини, середовища) надходить у бак 1, а поживні речовини – у бак 2. Через витратоміри 3 компоненти подаються до робочої камери РПА 8, де відбувається їх миттєве змішування під дією знакозмінних імпульсів тиску. Обробка може здійснюватися у двох режимах: безперервний режим – однократне проходження через камеру; режим рециркуляції – з повторною подачею суміші до камери для інтенсивнішої обробки.

Оброблені розчини надходять у бак 10 через клапан 9. Під час дослідження фіксуються параметри температури (датчики 4 і 6), тиску (датчики 5 і 7), а також інші показники, що реєструються аналогово-цифровим перетворювачем 11 і передаються на ПК 12 [2, с. 35].

Результати дослідження засвідчили суттєвий вплив знакозмінних імпульсів тиску на агрономічні показники вирощування пшениці сорту «Альбіна» та овес сорту «Чернігівський 28» у гідропонних умовах. У середньому, висота рослин після обробки поживного розчину зросла на 21,6%, продуктивність на 33,1%, маса мату на 34,4%, а коефіцієнт росту – на 21,3% порівняно з контрольними показниками (табл. 1).

Отримані дані засвідчують зростання продуктивності при оптимізації складу поживних розчинів, зміна фізико-хімічних параметрів середовища позитивно впливає на морфологічні показники рослин (рис. 2).

Таблиця 1

Вплив знакозмінних імпульсів тиску на продуктивність рослин у гідропонній системі

Культура	Параметр	Контроль	Обробка імпульсами	Зміна, %
Пшениця	Висота рослин, см	15,9 ± 0,3	18,7 ± 0,4	+17,6
	Продуктивність, кг/м ²	13,4 ± 0,5	17,8 ± 0,6	+32,8
	Маса мату, кг	26,6 ± 0,7	35,6 ± 0,8	+33,8
	Коефіцієнт росту	4,4 ± 0,2	5,3 ± 0,2	+20,5
Овес	Висота рослин, см	16,1 ± 0,3	18,8 ± 0,4	+16,8
	Продуктивність, кг/м ²	13,5 ± 0,5	18,0 ± 0,6	+33,3
	Маса мату, кг	40,1 ± 0,8	54,0 ± 1,0	+34,7
	Коефіцієнт росту	4,5 ± 0,2	5,4 ± 0,2	+20,0

Примітки: значення представлені як середнє ± стандартне відхилення (n=3); відсоток зміни розрахований відносно контрольного значення.

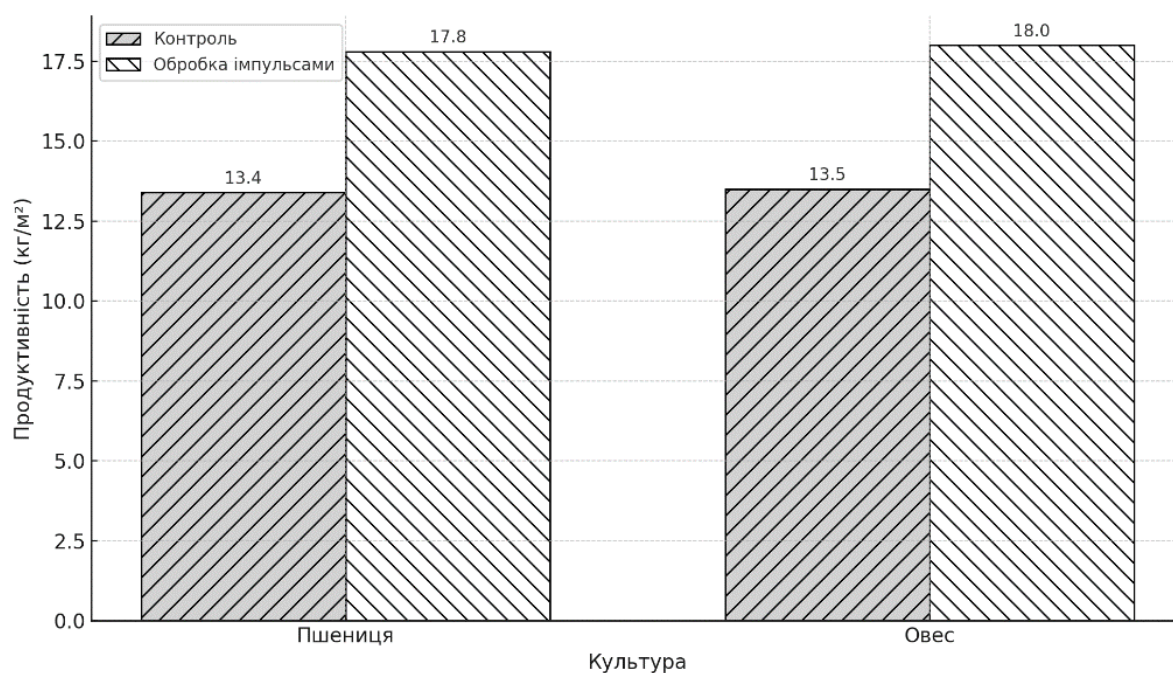


Рис. 2. Вплив знакозмінних імпульсів тиску на продуктивність рослин

Мікробіологічний аналіз показав формування сприятливої мікрофлори у розчинах після обробки. Виявлено такі домінуючі види: Хлорела Звичайна (*Chlorella vulgaris*), Хламідомонада Рейнхарда (*Chlamydomonas reinhardtii*), Амеба Протей (*Amoeba proteus*), Євглена Грициліс (*Euglena gracilis*), що свідчить про біологічну стабільність середовища (табл. 2).

Отже, застосування знакозмінних імпульсів тиску сприяє інтенсифікації процесів засвоєння поживних речовин, що, у свою чергу, забезпечує підвищення врожайності на 32,8–34%. Запропонований метод дає змогу модифікувати фізико-хімічні властивості живильних розчинів на мікро- та нанорівнях, що позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. Біологічний аналіз підтверджує формування стабільної мікрофлори в розчинах, що відкриває перспективи їх повторного використання в умовах гідропонного вирощування [5, с. 344].

Таким чином, технологія знакозмінних імпульсів тиску є перспективним інструментом для аграрного та харчового секторів, що

забезпечує зростання продуктивності за одночасного раціонального використання ресурсів.

На першому етапі вирощування зеленого гідропонного корму мінеральне живлення кореневої системи не застосовувалося. Теоретичне обґрунтування базується на тому, що протягом перших 5–12 діб ендосперм насінини забезпечує зародок і проросток поживними речовинами. У цей період відбувається спочатку гетеротрофне, а потім – автотрофне живлення за рахунок фотосинтезу [1, с. 981].

Ефективність обробки живильних середовищ знакозмінними імпульсами тиску залежить від параметрів оброблення. Встановлені оптимальні параметри: тривалість – 15–30 с, частота – 1–5 разів, кутова швидкість – 300–315 с⁻¹, імпульси тиску – 370–390 кПа.

Результати експериментальних досліджень, які демонструють вплив знакозмінних імпульсів тиску на ріст і продуктивність рослин у гідропонних системах, включаючи показники висоти рослин, продуктивності, середньої маси одного мату та темпу росту для різних варіантів

Таблиця 2

Біологічний склад живильних розчинів до та після культивування рослин

Поживний розчин	До вирощування	Після вирощування
Дистильована вода	Мікроорганізми відсутні	<i>Chlorella vulgaris</i> (після вирощування пшениці), <i>Amoeba proteus</i> (після вирощування овесу)
Вода для зрошення	Поодинокі мікроорганізми	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Euglena gracilis</i>
Розчин із добривами	Наявні мікроорганізми	<i>Cyanobacteria</i> (<i>Anabaena</i> spp., <i>Nostoc</i> spp.)

оброблення рідких живильних розчинів, які використовуються для вирощування культур, подано в табл. 3.

Аналіз експериментальних даних показав, що застосування знакозмінних імпульсів тиску для оброблення рідких живильних розчинів та середовища в гідропонних системах призвело до збільшення продуктивності пшениці «Альбіна» на 34% та продуктивності вівса «Чернігівський 28» на 33,8%. Крім того, приріст пшениці підвищився на 21,7%, а для вівса – на 22,2%. Найвища продуктивність була досягнута при використанні живильного розчину з добривами.

Найвищий приріст був зафіксований при використанні зрошувальної води для систем крапельного зрошення, що відповідає вимогам до кислотності води з агрономічними та екологічними критеріями. Оброблення рідкого живильного розчину в гідропоніці із застосуванням знакозмінних імпульсів тиску викликає структурні трансформації на мікро- та нанорівнях, в результаті чого змінюються фізико-хімічні параметри розчину, а також інтенсифікуються масопереносні та гідромеханічні процеси між макро- та мікроелементами й водою, що покращує їх засвоєння рослинами та прискорює їх ріст.

Висновки. В результаті досліджень було встановлено позитивний вплив знакозмінних імпульсів тиску на морфометричні показники та продуктивність зернових культур, зокрема пшениці та вівса. Оброблення гідродинамічним впливом сприяло підвищенню висоти рослин, маси мату, коефіцієнта росту та, найголовніше, продуктивності. Так, у порівнянні з контролем, продуктивність зросла на 32,8% для пшениці та на 33,3% для вівса. Отримані результати свідчать про доцільність застосування технології імпульсного впливу в агровиробництві з метою підвищення урожайності.

Запропоновані результати можуть стати основою для подальших міждисциплінарних досліджень із залученням інженерії, мікробіології та агрохімії. Пропонується розглядати можливість автоматизації контролю параметрів оброблення для промислових гідропонних систем.

Подальші дослідження доцільно зосередити на визначенні оптимальних параметрів імпульсів тиску, частоти та тривалості впливу для різних видів сільськогосподарських культур. Крім того, актуальним є вивчення економічної ефективності впровадження даної технології в умовах промислового землеробства.

Таблиця 3

Вплив знакозмінних імпульсів тиску на показники врожайності зеленої маси пшениці «Альбіна» та овес «Чернігівська 28», одержаних гідропонним способом

Параметр	Середовище	Пшениця сорту «Альбіна»		Овес сорту «Чернігівський 28»	
		Контроль	Обробка	Контроль	Обробка
Висота рослин, 10^{-2} м	Дист. вода	15.9±0.01	18.7±0.02	16.1±0.01	18.8±0.01
	Вода для зрошення	16.1±0.02	18.9±0.02	16.5±0.01	19.1±0.01
	Розчин з добривами	16.1±0.02	18.9±0.02	16.5±0.01	19.1±0.01
Урожайність, кг/м ²	Дист. вода	13.4±0.02	17.8±0.02	13.5±0.02	18.0±0.02
	Вода для зрошення	13.5±0.02	18.0±0.03	13.7±0.02	18.3±0.02
	Розчин з добривами	13.5±0.02	18.1±0.02	13.6±0.02	18.2±0.02
Середня маса мату, кг	Дист. вода	26.6±0.02	35.6±0.04	40.1±0.02	54.0±0.005
	Вода для зрошення	27.0±0.01	36.0±0.02	41.1±0.01	54.9±0.02
	Розчин з добривами	27.0±0.02	36.5±0.04	41.0±0.02	54.9±0.005
Коефіцієнт приросту, ум. од.	Дист. вода	4.4	5.3	4.5	5.4
	Вода для зрошення	4.5	5.5	4.5	5.6
	Розчин з добривами	4.5	5.5	4.6	5.6

Список літератури:

1. Abinandan S., Subashchandrabose S. R., Venkateswarlu K. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019. № 39 (8). P. 981–998. DOI: 10.1080/07388551.2019.1654972
2. Acevedo E., Silva P., Silva H. Wheat growth and physiology. *Plant Production and Protection*, 2002. № 30. P. 35–36.
3. Dubovkina I. Innovative Technology Of Water Treatment In Recirculating Aquaculture-hydroponic System. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади*

її конкурентоздатності: Матеріали VI Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 12 вересня 2017 р., м. Київ. К. НУХТ, 2017. С. 43–44.

4. Dubovkina I. Change of physical and chemical parameters of the liquid binary systems by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*, 2017. № 6 (1). P. 142–154. DOI: 10.24263/2304-974X-2017-6-1-16

5. Dubovkina I., Davydenko B., Rikhter V. Modelling of the hydrodynamic conditions throughout liquid system treatment by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*, 2019. № 8 (2). P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13

6. Hashizume T., Takaki K. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021. № 5 (1). P. 59. DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9

7. Kumar R., Rathore S., Kundlas K., Rattan S. Vertical farming and organic farming integration: a review. *Organic Farming: Global Perspectives and Methods (Woodhead Publishing Series in Food Science)*, 2023. P. 291–315. DOI: 10.1016/B978-0-323-99145-2.00002-1

8. Kumar A., Singh J. Trends in Hydroponics Practice/Technology in Horticultural Crops: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2023. № 35 (2). P. 57–65. DOI: 10.9734/ijpss/2023/v35i22759.

9. Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y., Ramasamy S., Khin M. C. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 2023. № 19 (9). P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925

10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 2002. № 7 (1). DOI: 10.1002/uar2.20012​

11. Shurchkova J., Dubovkina I. Research parameters of the water-ethanol mixture obtained under conditions of alternating impulses of pressure. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies*, 2015. № 46 (1155). P. 171–176.

12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – A state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 2022. № 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855

Dubovkina I.O., Myronchuk A.O. APPLICATION OF ALTERNATING IMPULSES OF PRESSURE FOR INTENSIFICATION OF HYDROPONIC

In light of the growing need for efficient use of water resources in agriculture, the issue of increasing crop yields in hydroponic systems is gaining particular relevance. This study is dedicated to the implementation of an innovative method of treating nutrient solutions with alternating pressure pulses, which enables the optimization of heat and mass transfer processes and improves the physicochemical properties of media used for plant cultivation.

A rotor-pulsation apparatus was used in the study to prepare nutrient solutions under varying parameters of pressure, pulse frequency, and treatment duration. Experimental testing was conducted on the growth of wheat plants of the “Albina” variety and oats of the “Chernihivskyi 28” variety under closed soil conditions. Microbiological analysis of the medium before and after treatment was performed using optical microscopy. Statistical methods were applied for data analysis, including the calculation of mean values and standard deviation.

The research results revealed that the use of alternating pressure pulses for the treatment of nutrient solutions significantly enhances agrobiological indicators. Plant height increased by 20.5–22.7%, indicating accelerated growth processes. Yield improved by 32.8–34%, demonstrating more efficient nutrient utilization. Additionally, an increase in plant mat mass and a higher growth coefficient were observed, reflecting greater biomass production. Biological analysis confirmed the development of beneficial microflora in the medium after treatment, contributing to a healthier microbial environment for plant growth. The technology shows potential for reducing water and fertilizer consumption, which is a key aspect of sustainable and resource-efficient agricultural production.

The practical value of the research lies in the development of an effective method for intensifying crop cultivation under closed soil conditions using hydroponic techniques, which contributes to increased yields and food security.

Key words: hydroponics, alternating pressure pulses, rotor-pulsation apparatus, nutrient solution, yield, heat and mass transfer, microflora, plant productivity.