

І. О. Дубовкіна, д-р техн. наук, старший наук. співроб., А. О. Мирончук, аспірантка

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ У ГІДРОПОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, Україна

Ключові слова: гідродинаміка, дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, напруження зсуву потоку, продуктивність.

Пошук нових енергоефективних технологій та способів є актуальним, враховуючи енергетичні витрати у переробній промисловості. На сьогоднішній день у світі зростає інтерес до гідропонних технологій вирощування як альтернативи до традиційного землеробства, що дозволяє культивувати рослини в умовах обмежених природних ресурсів, зокрема води та родючих ґрунтів. Впровадження гідропонних систем залежить насамперед від якості та стабільності живильного середовища, яке дає змогу забезпечувати рослини комплексом необхідних макро- і мікроелементів. При цьому традиційні методи одержання живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, достатню біологічну активність середовища та оптимальні фізико-хімічні параметри.

У сучасних дослідженнях доведено, що фізичні методи впливу на рідинні гетерогенні системи можуть змінювати їх фізико-хімічні характеристики та сприяти інтенсифікації масообміну. Зокрема, метод дискретно-імпульсного введення енергії поєднує низку гідродинамічних ефектів (напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміна тиску, пульсації потоку), які можуть бути використані для одержання живильних розчинів. Проте на сьогодні недостатньо досліджено вплив такого методу на агробіологічні показники рослин під час застосування гідропонних технологій, що зумовлює потребу у проведенні додаткових наукових досліджень.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розроблення та експериментальна перевірка застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії під час одержання живильних розчинів, який би сприяв підвищенню продуктивності рослин, покращенню їх морфометричних характеристик та формуванню сприятливого мікробного середовища при вирощуванні у гідропонних системах.

З огляду на зростання актуальності проблеми раціонального вирощування рослин у гідропонних системах, науковці дедалі більше уваги приділяють удосконаленню складу живильних середовищ, впровадженню автоматизованих технологій контролю агротехнічних параметрів та розробці енергоощадних методів обробки робочого середовища. У цьому напрямі вже здійснено низку фундаментальних досліджень як в Україні, так і за кордоном.

Так, у праці Кумара В. та співавторів наголошено на світовій тенденції поширення гідропоніки як інструмента реагування на наслідки зміни клімату, дефіцит водних ресурсів і зменшення площ родючих ґрунтів. Автори відзначають необхідність створення доступних та економічно вигідних автоматизованих систем, здатних працювати з мінімальним залученням людини [7, с. 291].

У статті Реджесера Г. проаналізовані можливості інтеграції смарт-технологій – сенсорних мереж, систем штучного інтелекту та автоматизованого керування – у практику гідропонного виробництва. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність моніторингу параметрів живильних розчинів і водночас знизити втрати води та добрив [8, с. 925].

Особливої уваги заслуговують дослідження Хашізуме Т. та Такакі К., яких розглядається дія імпульсних електричних полів і часомодульованої плазми на ріст рослин та мікробіологічні процеси. Отримані результати дають підстави стверджувати, що фізичні методи впливу, серед яких і знакозмінні імпульси тиску, можуть відігравати значну роль у підвищенні ефективності гідропонних технологій [6, с. 59].

У дослідженні Ванг С. та Рагвана В. показано, що біологічна модифікація живильного середовища шляхом додавання компосту, збагаченого бактеріями *Bacillus safensis*, позитивно впливає на розвиток салату та сприяє формуванню збалансованої мікробіоти [11].

Соціально-економічний вимір гідропонних технологій розглянуто у роботі Рамоса М., де автор аналізує бар'єри впровадження цифрових гідропонних систем у міських агропроєктах і підкреслює необхідність адаптації таких технологій до специфіки локальних спільнот [9].

Попри широкий спектр існуючих досліджень щодо оптимізації гідропонних систем, залишається низка невирішених питань. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються фізичні методи впливу на живильні розчини, здатні змінювати їхні фізико-хімічні параметри на мікро- та нанорівнях; обмежено досліджені гідродинамічні ефекти у гідропоніці, включаючи дію знакозмінних імпульсів тиску; бракує інформації щодо мікробіологічної стабільності середовищ після фізичного оброблення; не вистачає експериментів, які поєднували б енергофізичний вплив із біологічними результатами для рослин у контрольованих умовах.

Таким чином, проведені дослідження частково усуває наявні прогалини у науковій літературі, запропонувавши новий метод підвищення ефективності гідропонного вирощування на основі застосування знакозмінних імпульсів тиску. Цей підхід формує підґрунтя для подальших міждисциплінарних досліджень на перетині агрофізики, мікробіології та систем автоматизації.

Метою статті є оцінка ефективності застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії в гідропонних умовах та вплив одержаного живильного розчину на зростання та продуктивність рослин. Завдання наукової роботи полягає у проведенні експериментальних досліджень з одержання живильних розчинів із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) та дослідження впливу оброблених розчинів на зростання та врожайність обраних культур.

Методика дослідження ґрунтувалася на використанні роторно-пульсаційного апарата (РПА), в якому реалізовані гідродинамічні ефекти ДІВЕ в рідкому середовищі, а саме: напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміна тиску, пульсації потоку, що сприяють інтенсифікації тепломасообміну й масоперенесенню.

Об'єктами дослідження стали сільськогосподарські рослини: тритикале сорту Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ 9. Вибір цих культур обумовлений їхнім широким застосуванням у сільському господарстві та чутливістю до умов живильного середовища. Для експериментальних досліджень були використані три типи розчинів: бідистильована вода, вода для крапельного зрошення та мінералізований живильний розчин.

Для одержання живильних розчинів використовувались наступні параметри, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Гідродинамічні ефекти методу дискретно-імпульсного введення енергії, реалізовані в роторно-пульсаційному апараті

№ п/п	Технічний параметр	Значення
1	Час оброблення, с	10–600
2	Частота пульсацій потоку, Гц	1–5
3	Кутова швидкість, с^{-1}	300–315
4	Напруження зсуву потоку, 10^3Па	250–390
5	Швидкість зсуву потоку, 10^5с^{-1}	2,7–3,5

Після оброблення підготовлені живильні середовища подавалися у створений для фітотестування лабораторний гідропонний стенд. Умови вирощування підтримувалися стабільними: температура 21–24 °С, освітленість 900–1100 лк/м². Тривалість експериментальних серій з фітотестування становила 10–14 днів, що дозволяло провести оцінювання початкових фаз росту і розвитку рослин.

Отримані дані дали змогу комплексно оцінити ефективність застосування методу ДІВЕ при вирощуванні сільськогосподарських культур та виявити їх потенціал для інтенсифікації гідропонних технологій у рослинництві.

Для мікробіологічного аналізу використовувався метод оптичної мікроскопії (Carl Zeiss Axio Imager Vario II, збільшення $\times 640$), а саме для визначення видового складу і чисельності 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, зображений на рис. 1 [4, с. 45].

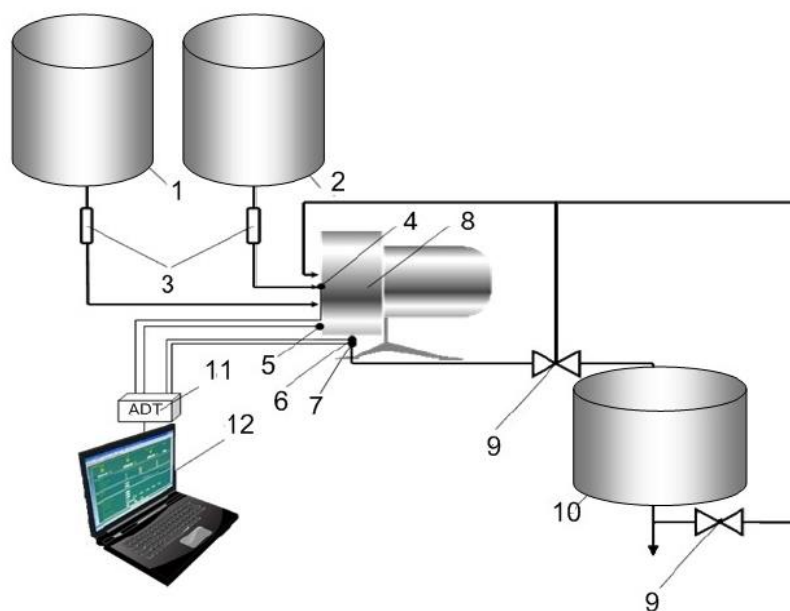


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки: 1 – бак для рідини; 2 – бак для поживних речовин; 3 – витратомір; 4, 6 – датчики температури; 5, 7 – датчики тиску; 8 – роторно-пульсаційний апарат; 9 – вентиль; 10 – бак для обробленого розчину; 11 – аналогово-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер

В основі експериментальної установки було обрано роторно-пульсаційний апарат (8), в якому здійснювалось гідродинамічне оброблення живильного розчину за рахунок напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміни тиску, пульсацій потоку.

Початковий розчин (вода чи інше середовище) подається у бак 1, тоді як поживні компоненти надходять у бак 2. Через витратоміри 3 складові потрапляють у робочу камеру роторно-пульсаційного апарата 8, де здійснюється їх миттєве змішування під впливом знакозмінних імпульсів тиску. Оброблення можливе у двох режимах: безперервний режим – одноразове проходження суміші через камеру та рециркуляційний режим – багаторазове оброблення середовища для інтенсивнішої дії.

Після оброблення розчин спрямовується у бак 10 через вентиль 9. У процесі експерименту здійснювався контроль температури (датчики 4 і 6), тиску (датчики 5 і 7) та інших параметрів, що реєструвалися за допомогою аналогово-цифрового перетворювача 11 і передавалися на ПК 12 [2, с. 35].

Отримані результати підтвердили відчутний вплив знакозмінних імпульсів тиску на морфометричні й декоративні характеристики тритикале сортів Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9, вирощуваних у гідропонній системі. У середньому було зафіксовано збільшення висоти рослин на 18–22 %, підвищення інтенсивності біомасоутворення на 31–34 %, приріст маси надземної частини на 33–36 % та зростання коефіцієнта росту на 20–22 % відносно контрольних варіантів (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив живильних розчинів, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на біомасоутворення сільськогосподарських рослин

Культура	Параметр	Контроль (середнє $\pm$ SD)	Обробка імпульсами (середнє $\pm$ SD)	Зміна, %
Амфіплоїд 44	Висота рослин, см	15,7 $\pm$ 0,3	18,6 $\pm$ 0,4	+18,5
	Продуктивність, кг/м ²	13,2 $\pm$ 0,4	17,6 $\pm$ 0,5	+33,3
	Маса, кг	26,4 $\pm$ 0,6	35,2 $\pm$ 0,8	+33,3
	Коефіцієнт росту	4,3 $\pm$ 0,2	5,2 $\pm$ 0,2	+20,9
Амфіплоїд 51	Висота рослин, см	16,0 $\pm$ 0,3	18,9 $\pm$ 0,4	+18,1
	Продуктивність, кг/м ²	13,5 $\pm$ 0,5	18,0 $\pm$ 0,6	+33,3
	Маса, кг	40,0 $\pm$ 0,7	53,7 $\pm$ 1,0	+34,3
	Коефіцієнт росту	4,4 $\pm$ 0,2	5,3 $\pm$ 0,2	+20,5
АДМ9	Висота рослин, см	16,2 $\pm$ 0,3	19,0 $\pm$ 0,4	+17,3
	Продуктивність, кг/м ²	13,6 $\pm$ 0,5	18,1 $\pm$ 0,6	+33,1
	Маса, кг	40,3 $\pm$ 0,8	54,1 $\pm$ 1,0	+34,2
	Коефіцієнт росту	4,5 $\pm$ 0,2	5,4 $\pm$ 0,2	+20,0

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

Отримані результати свідчать, що застосування живильних розчинів, одержаних методом ДІВЕ сприяють підвищенню продуктивності та позитивно позначаються на морфологічних характеристиках досліджуваних рослин (рис. 2).

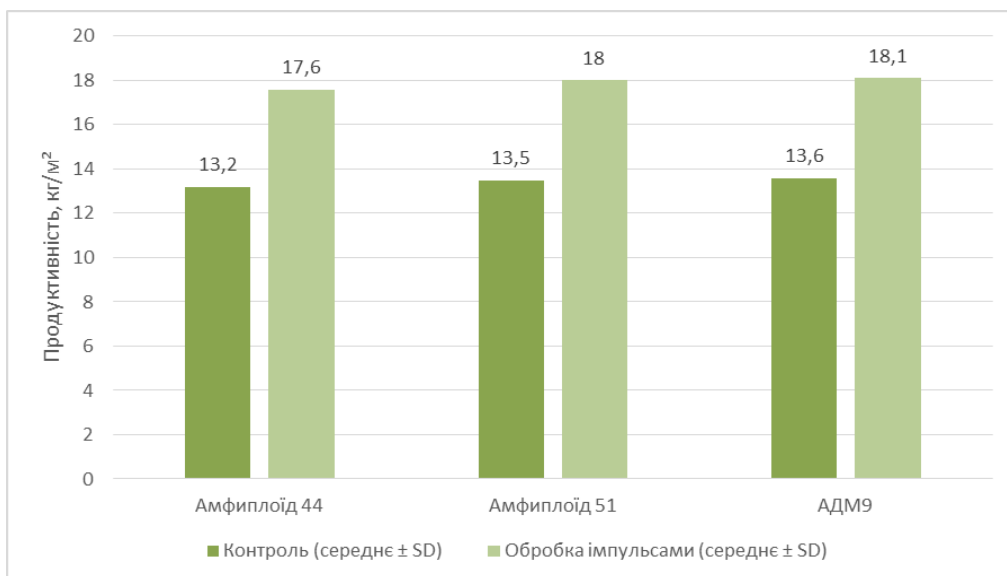


Рисунок 2 – Вплив методу ДІВЕ на продуктивність сільськогосподарських культур у гідропонній системі

Проведений мікробіологічний аналіз підтвердив формування корисної мікрофлори у живильних розчинах після їх оброблення. Серед виявлених домінуючих мікроорганізмів зафіксовано *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Amoeba proteus* та *Euglena gracilis*. Наявність цих видів свідчить про стабільність та біологічну збалансованість середовища (табл. 3).

Таблиця 3 – 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 Амфиплоїд 44), <i>Amoeba proteus</i> (після вирощування Амфиплоїд 51), <i>Nostoc spp.</i> (після вирощування АДМ9)
Вода для зрошення	Поодинокі мікроорганізми	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Euglena gracilis</i>
Розчин із добривами	Наявні мікроорганізми	<i>Cyanobacteria</i> (<i>Anabaena spp.</i> , <i>Nostoc spp.</i>)

Отже, застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії 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].

Було встановлено, що застосування методу ДІВЕ можна розглядати як перспективний для аграрного та харчового виробництва, оскільки він сприяє зростанню продуктивності культур при одночасному ощадливому використанні ресурсів.

На початкових етапах гідропонного вирощування сільськогосподарських культур мінеральне живлення кореневої системи не використовувалося. Відомо, що протягом перших 7–12 днів рослина функціонує за рахунок власних запасів: поживні речовини, що містяться у тканинах, забезпечують розвиток зародка та початкових пагонів. У цей час живлення має комбінований характер: спершу переважає гетеротрофний тип, а згодом, завдяки активації фотосинтезу, формується автотрофний механізм [1, с. 981].

Результативність одержання живильних розчинів за допомогою методу ДІВЕ залежить від технічних параметрів під час оброблення та одержання. В результаті проведення серії експериментальних досліджень було встановлено, що оптимальними є: тривалість впливу 15–30 с, частота пульсацій потоку 1–5 Гц, напруження зсуву потоку, $370\text{--}390 \cdot 10^3 \text{ Па}$, кутова швидкість $300\text{--}315 \text{ с}^{-1}$, швидкість зсуву потоку $3,2\text{--}3,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Отримані експериментальні дані підтвердили, що використання такого режиму стимулює морфогенетичні процеси у сільськогосподарських культур, сприяє посиленню ростових функцій і суттєво покращує їхні морфометричні показники.

Узагальнені результати, які відображають вплив методу ДІВЕ на динаміку росту та врожайність Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9 в умовах гідропоніки (зокрема висоту рослин, продуктивність, середню масу надземної частини й коефіцієнт росту), наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив живильних розчинів, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на вирощування сільськогосподарських культур, одержаних гідропонним способом

Культура	Параметр	Контроль (середнє $\pm$ SD)	Обробка імпульсами (середнє $\pm$ SD)	Зміна, %
Амфіплоїд 44	Висота рослин, см	$15,8 \pm 0,3$	$18,6 \pm 0,4$	+17,7
	Продуктивність, кг/м^2	$13,3 \pm 0,5$	$17,7 \pm 0,6$	+33,1
	Маса, кг	$26,5 \pm 0,7$	$35,3 \pm 0,8$	+33,2
	Коефіцієнт росту	$4,3 \pm 0,2$	$5,2 \pm 0,2$	+20,9
Амфіплоїд 51	Висота рослин, см	$16,0 \pm 0,3$	$18,9 \pm 0,4$	+18,1
	Продуктивність, кг/м^2	$13,4 \pm 0,5$	$18,0 \pm 0,6$	+34,3
	Маса, кг	$40,0 \pm 0,8$	$53,8 \pm 1,0$	+34,5
	Коефіцієнт росту	$4,4 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,2$	+20,5
АДМ9	Висота рослин, см	$16,2 \pm 0,3$	$19,0 \pm 0,4$	+17,3
	Продуктивність, кг/м^2	$13,6 \pm 0,5$	$18,2 \pm 0,6$	+33,8
	Маса, кг	$40,2 \pm 0,8$	$54,0 \pm 1,0$	+34,3
	Коефіцієнт росту	$4,5 \pm 0,2$	$5,4 \pm 0,2$	+20,0

Аналіз отриманих результатів експерименту показав, що використання знакомінних імпульсів тиску при обробленні живильних розчинів у гідропонних установках значно підвищує продуктивність рослин. Зокрема, врожайність Амфіплоїду 44 збільшилася на 33,1 %, Амфіплоїду 51 – на 34,3 %, а АДМ9 – на 33,8 % відносно контрольних зразків. Додатково зафіксовано зростання біомаси в середньому на 20–22 % залежно від виду рослини. Найбільше підвищення врожайності спостерігалось при використанні мінералізованого живильного розчину, тоді як найбільш інтенсивний приріст морфометричних показників був характерний для варіанту з водою, підготовленою для

систем крапельного зрошення, що відповідає агрономічним та екологічним вимогам до її якості.

Доведено, що вплив методу ДІВЕ викликає структурні перетворення на мікро- і нанорівнях, у результаті чого змінюються фізико-хімічні характеристики середовища, що стимулює масопереносні та гідродинамічні процеси між водою та поживними елементами, покращує їх доступність для рослин і прискорює їх розвиток. Отже, технологія підтвердила свою ефективність для рослин, оскільки забезпечує не лише зростання зеленої біомаси, а й покращення їхніх морфологічних характеристик.

В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено позитивний вплив використання живильних середовищ, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на морфометричні характеристики та біологічну продуктивність сільськогосподарських культур – Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9. Оброблення живильних розчинів у роторно-пульсаційному апараті сприяло зростанню висоти рослин, маси надземної частини, коефіцієнта росту та приросту зеленої біомаси. Порівняно з контрольними варіантами, приріст зеленої маси становив 33,1 % для Амфіплоїду 44, 34,3 % для Амфіплоїду 51 та 33,8 % для АДМ9. Одержані дані свідчать про ефективність використання гідродинамічного впливу для інтенсифікації процесів живлення та розвитку сільськогосподарських рослин у гідропонних системах.

Отримані результати доводять, що застосування методу ДІВЕ для одержання живильних розчинів є доцільним не лише з точки зору підвищення біомасоутворення, але й для покращення морфометричних властивостей рослин – інтенсивності забарвлення та рівномірності росту, що вказує на перспективність технології для широкого впровадження у практику промислового й експериментального рослинництва.

Наведені дані можуть стати підґрунтям для подальших міждисциплінарних досліджень із залученням інженерних, мікробіологічних та агрохімічних підходів. Особливої уваги потребує визначення оптимальних параметрів оброблення для різних видів культур, а також розробка автоматизованих систем контролю процесу у масштабах промислових гідропонних комплексів.

Подальші дослідження варто спрямувати на уточнення параметрів гідродинамічного оброблення шляхом застосування методу ДІВЕ – для різних груп рослин, а також на оцінку економічної доцільності впровадження технології в умовах промислового землеробства.

Література

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. Vol. 39, iss. 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. No. 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 Міжнар. спеціалізованої наук.-практ. конф., 12 вересня 2017 р., м. Київ. Київ : 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. Vol. 6, iss. 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. Vol. 8, iss. 2. P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13.
6. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N. et al. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2021. Vol. 5, article number 12. 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. Vol. 35, iss. 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. Vol. 19, iss. 9. P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925.
10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*. 2002. Vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1002/uar2.20012.
11. Шурчкова Ю. О. Дослідження параметрів водно-спиртових сумішей отриманих в умовах знакозмінних імпульсів тиску. Ю. О. Шурчкова, І. О. Дубовкіна. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"* : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ". 2015. № 36 (1145) : Механіко-технологічні системи та комплекси : темат. вип. С. 97–100.
12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – a state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855.

Bibliography (transliterated)

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. Vol. 39, iss. 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. No. 30. P. 35–36.
3. Dubovkina I. Innovative technology of water treatment in recirculating aquaculture-hydroponic system. *Resurso- ta enerhooshchadni tekhnolohii vyrobnytstva i pakuvannia kharchovoi produktsii – osnovni zasady yii konkurentozdatnosti* : materialy VI Mizhnarodnoi spetsializovanoi nauk.-prakt. kon., 12 veresnia 2017 r., m. Kyiv. Kyiv : NUKhT, 2017. P. 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. Vol. 6, iss. 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. Vol. 8, iss. 2. P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13.
6. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N. et al. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2021. Vol. 5, article number 12. 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. Vol. 35, iss. 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. Vol. 19, iss. 9. P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925.
10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*. 2002. Vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1002/uar2.20012.
11. Shurchkova Yu. O. Doslidzhennia parametriv vodno-spyrtovykh sumishei otrymanykh v umovakh znakovminnykh impulsiv tysku. Yu. O. Shurchkova, I. O. Dubovkina. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI"* : zb. nauk. pr. Kharkiv : NTU "KhPI". 2015. № 36 (1145) : Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekсы : temat. vyp. P. 97–100.
12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – a state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855.

УДК 536.423

І. О. Дубовкіна, д-р техн. наук, старший наук. співроб., А. О. Мирончук, аспірантка

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ У ГІДРОПОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

У статті розглянуто застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) для інтенсифікації гідропонних технологій. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим інтересом до гідропоніки як альтернативи традиційному землеробству в умовах обмежених природних ресурсів. Відзначено, що традиційні методи підготовки живильних середовищ не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, біологічну стабільність та оптимальні фізико-хімічні параметри. У цьому контексті використання фізичних методів впливу, зокрема знакозмінних імпульсів тиску, відкриває нові можливості для підвищення продуктивності рослин.

Метою дослідження стала оцінка ефективності застосування ДІВЕ у гідропонних умовах та вплив одержаних живильних розчинів на ріст і врожайність культур. Методика ґрунтувалася на використанні роторно-пульсаційного апарата, що забезпечує дію напружень і швидкостей зсуву потоку, зміну тиску та пульсації середовища. Об'єктами дослідження були сорти тритикале (Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9), для яких проводили фітотестування в лабораторних умовах із різними типами розчинів.

Отримані результати підтвердили позитивний вплив оброблення розчинів методом ДІВЕ: висота рослин зросла в середньому на 18–22 %, інтенсивність біомасоутворення – на 31–34%, маса надземної частини – на 33–36%, а коефіцієнт росту – на 20–22 % порівняно з контролем. Крім того, було зафіксовано формування корисної мікрофлори (*Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Euglena gracilis* тощо), що свідчить про біологічну збалансованість живильного середовища після оброблення. Опти-

мальними параметрами визнано тривалість дії 15–30 с, частоту пульсацій 1–5 Гц та напруження зсуву $370\text{--}390 \cdot 10^3$ Па.

Таким чином, застосування ДІВЕ є ефективним для інтенсифікації гідропонного вирощування сільськогосподарських культур. Технологія забезпечує підвищення врожайності на 32,8–34 %, покращує морфометричні характеристики та створює стабільне мікробне середовище, що вказує на перспективність методу для впровадження у промислових масштабах, а також відкриває напрями подальших міждисциплінарних досліджень з оптимізації параметрів гідродинамічного оброблення й економічної доцільності використання у сучасному рослинництві.

Ключові слова: гідродинаміка, дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, напруження зсуву потоку, продуктивність.

I. O. Dubovkina, A. O. Myronchuk

APPLICATION OF THE DISCRETE-IMPULSE ENERGY INPUT METHOD TO INCREASE PRODUCTIVITY IN HYDROPONIC TECHNOLOGIES

The article examines the application of the method of discrete-impulse energy input (DIEI) for the intensification of hydroponic technologies. The relevance of the study is driven by the growing interest in hydroponics as an alternative to traditional agriculture under conditions of limited natural resources. It is noted that conventional methods of preparing nutrient solutions do not always ensure uniform distribution of components, biological stability, and optimal physicochemical parameters. In this context, the use of physical methods of influence, particularly alternating pressure pulses, opens up new opportunities for increasing plant productivity.

The aim of the study was to evaluate the effectiveness of DIEI under hydroponic conditions and to assess the impact of the obtained nutrient solutions on plant growth and yield. The methodology was based on the use of a rotor-pulsation apparatus, which provides the effects of flow shear stresses and rates, pressure variations, and flow pulsations. The objects of the study were triticale varieties (Amphiploid 44, Amphiploid 51, ADM9), which were tested in laboratory hydroponic conditions using different types of solutions.

The results confirmed the positive effect of DIEI-treated solutions: plant height increased on average by 18–22 %, biomass formation intensity by 31–34 %, aboveground mass by 33–36 %, and growth coefficient by 20–22 % compared to the control. In addition, the formation of beneficial microflora (*Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Euglena gracilis*, etc.) was observed, indicating the biological balance of the nutrient medium after treatment. The optimal parameters were determined as a treatment duration of 15–30 seconds, flow pulsation frequency of 1–5 Hz, and shear stress of $370\text{--}390 \cdot 10^3$ Pa.

Thus, the application of DIEI is effective for intensifying hydroponic cultivation of agricultural crops. The technology increases yields by 32.8–34 %, improves morphometric characteristics, and creates a stable microbial environment, which indicates the potential of the method for industrial-scale implementation. It also opens avenues for further interdisciplinary research aimed at optimizing hydrodynamic treatment parameters and evaluating the economic feasibility of its use in modern crop production.

Keywords: hydroponics, alternating pressure pulses, rotor-pulsation apparatus, ornamental crops, iris, boxwood, hydrangea, microflora, productivity.