

УДК 631.67:635.9

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.17-26>

П. М. Луц, канд. техн. наук

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

e-mail: lutspm@gmail.com

Оцінка ефективності використання гідропневматичних систем туманоутворення в тепличних приміщеннях для живцювання та пророщування

У статті проведено комплексний аналіз ефективності використання гідропневматичних (небулайзерних) систем туманоутворення у порівнянні з системами туманоутворення інших типів для створення оптимальних умов мікроклімату в тепличних приміщеннях при зеленому живцюванні чи пророщуванні насіння.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення продуктивності тепличного виробництва в умовах обмежених водних ресурсів, змін клімату та вимог до високоякісного посадкового матеріалу. Виконано порівняльний аналіз туманоутворювачів з різними ключовими техніко-експлуатаційними характеристиками: робочим тиском, витратою води, розміром краплі та ефективністю охолодження та зволоження. Порівнюючи ефективність встановлено, що системи високого тиску часто є оптимальним рішенням для промислових теплиць за співвідношенням «ефективність – витрати», тоді як гідропневматичні небулайзерні системи є найбільш перспективними для високотехнологічних комплексів. Вибір типу системи має ґрунтуватися на природно-кліматичних, господарсько-економічних та фізіологічних факторах.

гідропневматична система, небулайзер, туманоутворювач, мікродисперсне зрошення, пророщування насіння, зелене живцювання, мікроклімат теплиці, енергоефективність

Постановка проблеми. Для створення сприятливого мікроклімату в тепличних приміщеннях, зазвичай, використовують методи з впливом одразу на декілька взаємопов'язаних параметрів. До основних з них відносяться: регулювання показників температури повітря та ґрунту, відносної вологості повітря і ґрунту, рівня освітлення, необхідний об'єм зрошення, концентрація рівня діоксиду вуглецю (CO_2) та загальна інтенсивність вентиляції.

Ці методи (рис. 1) спрямовані на створення оптимальних умов для росту та розвитку рослин у тепличних приміщеннях, забезпечення високої якості посадкового матеріалу та підвищення продуктивності в цілому господарства.

Методи впливу на параметри мікроклімату тісно взаємозалежні, що зумовлює необхідність комплексного підходу до управління середовищем. Підвищення температури, наприклад, часто призводить до зниження відносної вологості повітря, тому обігрів теплиці вимагає додаткового зволоження. Вентиляція знижує температуру, але одночасно виносить вологу та CO_2 , що може зменшити ефективність подачі діоксиду вуглецю. Додаткове освітлення підвищує температуру всередині приміщення, тому потребує балансування із системами затінення та туманоутворення. У разі інтенсивної вентиляції подача CO_2 стає менш ефективною через швидку зміну складу повітря.

Освітлення підвищує температуру в теплиці, тому важливо враховувати цей фактор при плануванні системи обігріву та вентиляції. Природне освітлення в деяких регіонах потребує врахування змін інтенсивності сонячного світла протягом дня та сезону та використання додатково до системи вентиляції систему затінювання.

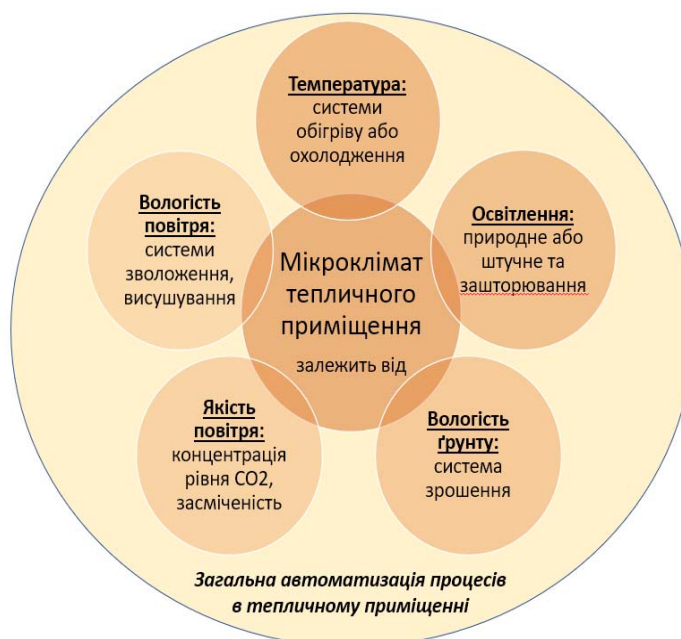


Рисунок 1 – Схема контролюємих параметрів, необхідних для створення сприятливого мікроклімату в тепличних приміщеннях

Джерело: розроблено автором

Подача діоксиду вуглецю (CO₂) додатково до теплиці може бути неефективною, якщо в цей час у інтенсивному режимі працює вентиляційна система, оскільки це призводить до швидкої зміни складу повітря теплиці. Потрібно збалансувати подачу діоксиду вуглецю з режимом вентиляції, щоб забезпечити оптимальні умови для фотосинтезу.

Особливо критичним є підтримання оптимальних умов у періоди зеленого живцювання та пророщування насіння, коли молоді рослини найбільш вразливі та чутливі до коливань температури, вологості та механічного стресу. У таких умовах традиційні методи зрошення (крапельне, дощування) часто не забезпечують делікатного та рівномірного зволоження, спричиняючи пересихання субстрату чи перезволоження листя або нерівномірний розподіл води. Саме тому мікродисперсне (аерозольне) туманоутворення набуває особливого значення: воно дозволяє створювати дрібнодисперсний туман, який швидко випаровується, підтримуючи стабільну відносну вологість повітря без надмірного змочування рослин і конструкцій теплиці. Це сприяє здоровому розвитку рослин.

Мета та завдання дослідження. Комплексний аналіз ефективності використання гідропневматичних (небулайзерних) систем туманоутворення у порівнянні з системами туманоутворення низького та високого тиску для створення оптимальних умов мікроклімату в тепличних приміщеннях при зеленому живцюванні та пророщуванні насіння, а також в обґрунтуванні науково-практичних рекомендацій щодо їх вибору та застосування з урахуванням техніко-економічних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема створення оптимального мікроклімату в тепличних приміщеннях для зеленого живцювання та пророщування насіння тривалий час перебуває в центрі уваги науковців і практиків. Значна кількість робіт присвячена вивченню впливу систем туманоутворення на параметри вологості, температури та дефіциту тиску пари (VPD), а також на фізіологічні процеси розвитку коріння живців й проростання насіння.

Міжнародні дослідження переконливо доводять ефективність систем туманоутворення високого тиску (high-pressure fogging) для адіабатного охолодження та зволоження теплиць. Зокрема, Perdignes та співавтори (2008) порівнювали різні стратегії охолодження теплиць і встановили, що системи туманоутворення високого тиску забезпечують більш рівномірний розподіл температури та вологості порівняно з випарними панелями та системами низького тиску, хоча й потребують більших капітальних витрат [1]. Автори підкреслюють, що розмір крапель 5 – 20 мкм дозволяє майже повне випаровування води в повітрі, що знижує ризик перезволоження субстрату та захворювань.

Аналогічні результати отримані в практичних рекомендаціях UMass Extension [2] та матеріалах MicroCool і MeeFog [3]: системи туманоутворення високого тиску (50 – 90 бар) суттєво знижують температуру на 5 – 15 °C, підвищують відносну вологість без змочування поверхні листя та прискорюють укорінення живців завдяки підтриманню оптимального рівня парового тиску [4, 5]. Дослідження Grower Talks (2017) показують, що правильне застосування туману в камерах пророщування дозволяє зменшити відсоток браку живців до 50 % порівняно з традиційним дощуванням [6]. При цьому інтеграція таких систем у структуру автоматизованого керування теплицею забезпечує ефективний контроль параметрів мікроклімату [7].

Гідропневматичні (небулайзерні) системи, які працюють за рахунок розпилення води стисненим повітрям, вивчені набагато менше, але вважаються найбільш перспективними за рахунок високого ступеня дисперсності. За даними виробника TurboFog (NaanDanJain) двофазне розпилення дає можливість розпилити воду до розміру краплі 3 – 40 мкм і забезпечує максимально рівномірне зволоження з можливістю точного регулювання мікроклімату [8, 9]. Однак наукові публікації відзначають вищі експлуатаційні витрати через необхідність компресорного обладнання.

В Україні дослідження систем туманоутворення переважно мають прикладний характер і зосереджені у вигляді комерційних пропозицій таких організацій, як СпецПоливСервіс [10], Rain&Fog [11], Теспоcooling [12], Енергомаш [13]. Досліджень, у яких здійснюється порівняння ефективності систем високого тиску та гідропневматичних систем саме для умов живцювання та пророщування, на сьогодні практично не представлено. Приклад вивчення енерговитрат і продуктивності гідропонних систем, які часто поєднуються з туманоутворенням розглянуто в статті [14], в якій автори представили ключові аспекти ресурсозбереження в захищеному ґрунті.

Постановка завдання. Досягнення поставленої мети з врахуванням проаналізованих досліджень було визначено основні напрямки дій та сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати взаємозалежність головних параметрів мікроклімату теплиць (температура, відносна вологість, вентиляція, концентрація CO₂, освітлення) та встановити місце мікродисперсного (аерозольного) зрошення в забезпеченні стабільних умов для молодих рослин;
- виконати порівняльну характеристику різних типів туманоутворювачів (низького, середнього та високого тиску, а також гідропневматичних небулайзерних систем) за ключовими техніко-експлуатаційними показниками – робочим тиском, витратою води, розміром краплі та ефективністю охолодження й зволоження;
- оцінити вплив цих систем на процеси укорінення живців та проростання насіння, зокрема на зниження механічного стресу, ризик розвитку захворювань та якість посадкового матеріалу;

- визначити економічні та енергетичні переваги досліджуваних систем порівняно з традиційними методами зрошення з урахуванням економії водних ресурсів і можливостей автоматизації;

- виявити перспективи подальшого вдосконалення систем мікродисперсного туманоутворення та їх інтеграція в автоматизовані комплекси керування мікрокліматом теплиць.

Вирішення цих завдань дозволить об'єктивно оцінити ефективність сучасних технологій туман утворення та створить практичні рекомендації для тепличних господарств.

Виклад основного матеріалу. Ефективне формування мікроклімату в тепличних приміщеннях є одним із визначальних чинників інтенсифікації рослинництва, оскільки саме параметри температури, відносної вологості повітря та дефіциту тиску водяної пари (VPD) безпосередньо впливають на процеси транспірації, фотосинтезу та сприяє покращенню якості укорінення рослин [2, 3]. У сучасних технологіях вирощування все більшого поширення набувають системи мікрозрошення, які також називають дрібнодисперсним або аерозольним зрошенням. Такі системи дозволяють не лише здійснювати полив, а й ефективно регулювати мікроклімат у теплиці [8, 9].

Економія води та ресурсів, та загальна енергоефективність є ще однією перевагою мікродисперсного зрошення. Така система дозволяє більш ефективно використовувати воду, оскільки вона доставляється безпосередньо до рослин у формі мікрокрапель, зменшуючи випаровування та втрати води. Це сприяє економії водних ресурсів і знижує витрати на полив та зменшує ризик захворювань через зниження вологого періоду по листках рослин, що зменшує ризик розвитку грибкових захворювань та інших патогенів.

Поєднання мікрозрошення з традиційними методами поливу дозволяє оптимізувати водний режим, зменшити температурний стрес рослин, підвищити врожайність і забезпечити більш раціональне використання ресурсів [6, 9]. Вибір режимів роботи системи повинен враховувати кількість днів із критичними температурами та добову динаміку змін температури і вологості.

Доцільність використання таких систем безпосередньо пов'язана з природно-кліматичними (рельєф, клімат, забезпеченість та якість води) та господарсько-економічними факторами (склад та особливості культури, що вирощується, ресурсозабезпеченість, фізіологічні потреби рослин, умови обробітку).

З таблиці порівняння ефективності створення мікроклімату в тепличних приміщеннях (табл. 1) прослідковується чітка залежність між робочим тиском, витратою води, розміром краплі та з цього всього – здатністю систем забезпечувати охолодження та зволоження повітря. Форсунки типу мікроджет, такі як MJ-1302 виробництва Presto-PS, працюють при відносно низькому тиску 0,3–0,4 МПа і формують зону мікродощування з розміром краплі величиною 130–160 мкм, що є достатньо крупною та зумовлює їх низьку ефективність у процесах адіабатного охолодження. Значна частина води в цьому випадку не випаровується у повітрі, а осідає на рослинах і конструкціях теплиці, викликаючи локальне перезволоження та знижуючи рівномірність протікання процесів мікроклімату, хоча енергоспоживання таких систем є меншим.

Форсунки середнього тиску, зокрема Netafim CoolNet Pro™ та Tavlit серій EXL та 4191, працюють у діапазоні 0,25 – 0,4 МПа і забезпечують формування хмари з краплею розміром 50 – 120 мкм. У цьому варіанті досягається часткове випаровування води у повітрі, що суттєво підвищує ефективність охолодження порівняно з

мікроджетами. Зокрема, зменшення розміру краплі до 50 мкм (EXL) дозволяє збільшити площу теплообміну й, відповідно, інтенсивність випаровування, що позитивно впливає на зниження температури та стабілізацію відносної вологості. Проте й у таких системах частина крапель осідає, особливо при високій вологості повітря, що обмежує їх ефективність у спеку. Витрата води від 12 до 60 л/год. дозволяє забезпечити достатньо інтенсивне зволоження, але водночас підвищене водоспоживання.

Таблиця 1 – Характеристики різних типів туманоутворювачів та мікродощувачів

Найменування, виробник	Зображення	Витрата води, л/год	Робочий тиск, МПа	Розмір краплі, мкм
Туманоутворювачі мікроджет MJ-1302, Presto-PS (Україна)		27 – 35	0,3 – 0,4	130 – 160
Туманоутворювачі CoolNet Pro™, Netafim (Ізраїль)		12 – 50	0,25 – 0,35	60 – 120
Туманоутворювачі Серії 4191, Tavlit (Ізраїль)		12 – 50	0,25 – 0,35	60 – 120
Туманоутворювачі EXL, Tavlit (Ізраїль)		30 – 60	0,3 – 0,4	50 – 100
Туманоутворювачі Super Fogger, NDJ (Ізраїль)		20 – 42	0,4 – 0,6	45 – 90
Туманоутворювачі високого тиску Ender (Туреччина)		3 – 10	5 – 7	5 – 20
Небулайзер TurboFog, NDJ, (Ізраїль / Індія)		1,3 – 10	1,2 – 3,0 (вода) 0,2 – 0,25 (повітря)	3 – 40

Джерело: розроблено автором

Туманоутворювачі типу Super Fogger компанії NaanDanJain, що працюють при дещо вищому тиску 0,4 – 0,6 МПа і формують розмір краплі 45 – 90 мкм, демонструють покращену ефективність у порівнянні з попередніми системами [10 - 13]. Менший розмір краплі забезпечує більш інтенсивне випаровування і, відповідно, краще охолодження без значного змочування поверхні рослин. Це дозволяє досягати більш

рівномірного розподілу вологості в об'ємі теплиці, що є важливим фактором для запобігання стресу рослин.

Високий рівень ефективності з точки зору адіабатичного охолодження забезпечують туманоутворювачі високого тиску, наприклад турецької фірми Ender, які працюють при 50 – 70 МПа і формують ультрадрібну краплю розміром 5 – 20 мкм. За таких умов відбувається майже повне випаровування води у повітрі ще до досягнення поверхні рослин, що забезпечує максимальний ефект охолодження при мінімальній витраті води. Однак використання таких систем потребує значних енергетичних витрат і високої якості підготовки води.

Найбільш технологічно досконалі є гідропневматичні туманоутворювачі (небулайзери) типу TurboFog виробництва NaanDanJain, які працюють із поєднанням води під тиском 1,2 – 3,0 МПа та стисненого повітря (2 – 2,5 бар), що спроможні формувати розмір краплі від 3 до 40 мкм [8, 12]. Завдяки використанню двофазного розпилення досягається найвищий ступінь дисперсності та рівномірності утворення туману, що забезпечує практично повне випаровування води і максимальну ефективність як охолодження, так і зволоження. Такі системи дозволяють точно регулювати параметри мікроклімату залежно від потреб рослин, що є особливо важливим у високотехнологічних тепличних комплексах. Разом із тим їх застосування пов'язане з підвищеною складністю експлуатації та більшими енергетичними витратами.

Кількісне порівняння ефективності різних типів туманоутворювачів у тепличних приміщеннях, використовуючи інтегральний показник ефективності, який враховує основні функціональні характеристики систем, такі як здатність до охолодження, зволоження, енергоефективність можливо визначити за формулою:

$$E = 0,4 \cdot E_{\text{охол}} + 0,4 \cdot E_{\text{звол}} + 0,2 \cdot E_{\text{енерг}}, \quad (1)$$

де $E_{\text{охол}}$ – відносна ефективність охолодження; $E_{\text{звол}}$ – ефективність зволоження; $E_{\text{енерг}}$ – енергоефективність системи.

Розрахунок коефіцієнтів, взятих у вираз, виконано на основі залежності визначеного впливу: параметрів температури та вологості повітря, тоді як енергоспоживання має дещо менший, але все ж суттєвий вплив. Оцінювання кожної складової здійснено за п'ятибальною шкалою із приведенням технічних параметрів до безрозмірного вигляду. Так, ефективність охолодження визначається передусім розміром краплі: чим менший діаметр, тим інтенсивніше відбувається випаровування і тим вищий коефіцієнт має система. Наприклад, мікроджет-форсунки MJ-1302 виробництва Presto-PS з розміром краплі 130 – 160 мкм отримують оцінку $E_{\text{охол}} = 1$, тоді як системи високого тиску з розміром краплі 5 – 20 мкм мають $E_{\text{охол}} = 5$. Ефективність зволоження визначено рівномірністю розподілу вологи, та тривалістю перебування розпиленої краплі у повітрі. Системи середнього тиску, такі як Netafim CoolNet Pro™ та Tavlit, забезпечують високу рівномірність зволоження і отримують оцінку у 4 бали, тоді як гідропневматичні системи типу TurboFog NaanDanJain – 5 балів завдяки найкращій дисперсності. Показник енергоефективності оцінюється за рівнем складності створення робочого тиску та необхідністю додаткового обладнання. Системи низького тиску (0,3 – 0,4 МПа) отримують максимальну оцінку $E_{\text{енерг}} = 5$, тоді як системи високого тиску (5 – 7 МПа) мають лише 1 бал через значні енергетичні витрати.

Результати розрахунків інтегральних залежностей, наведені в таблиці 2, свідчать про найвищу ефективність гідропневматичних систем, які забезпечують максимальний рівень з можливістю оперативного контролю мікрокліматом в приміщеннях теплиць.

Системи високого тиску демонструють дещо нижчий показник через енергетичні витрати, однак залишаються високоефективними для охолодження. Системи середнього тиску є компромісним варіантом, поєднуючи достатню ефективність і помірні витрати енергії, тоді як мікроджет-форсунки мають найнижчу ефективність і можуть застосовуватись переважно в допоміжних системах.

Таблиця 2 – Розрахунок значень інтегральних залежностей енергоефективності

Марка та тип туманоутворювача	Послідовність розрахунку	Енергоефективність E , ум. од.
MJ-1302 (Presto-PS)	$0,4 \cdot 1 + 0,4 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5$	2,6
CoolNet Pro™ (Netafim)	$0,4 \cdot 3 + 0,4 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5$	3,8
EXL (Tavlit)	$0,4 \cdot 3 + 0,4 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5$	3,8
Super Fogger (NDJ)	$0,4 \cdot 4 + 0,4 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4$	4,0
Високого тиску (Ender)	$0,4 \cdot 5 + 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 1$	4,2
TurboFog (NDJ)	$0,4 \cdot 5 + 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 2$	4,4

Джерело: розроблено автором

Для наочного порівняння ефективності різних типів форсунок побудовано гістограму (рис. 2), яка демонструє співвідношення їх ефективності за критеріями охолодження, зволоження та енергоспоживання.

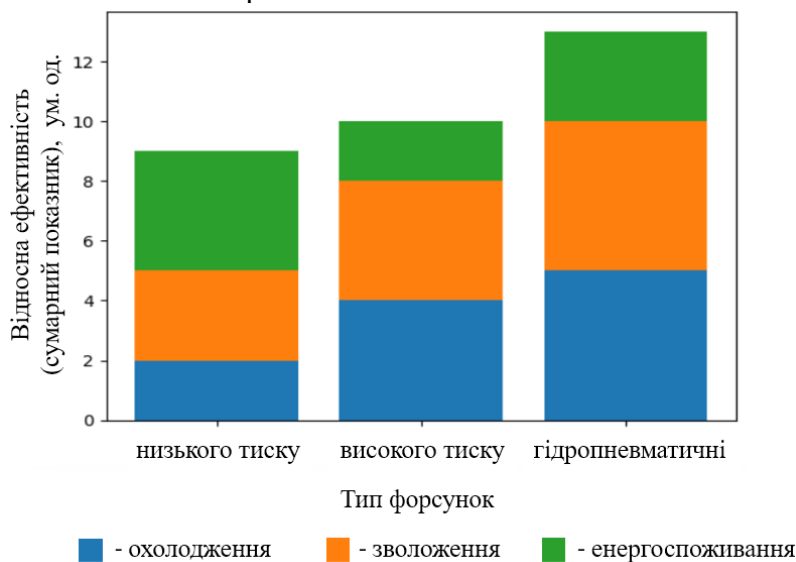


Рисунок 2 – Порівняльна ефективність систем туманоутворення в теплицях

Джерело: розроблено автором

Аналіз показує, що форсунки низького тиску є енергоощадними, але малоефективними, оскільки формують краплі великого діаметра, які не встигають повністю випаровуватись у повітрі теплиці [1, 8]. Водночас вони демонструють низькі показники енергоспоживання завдяки відсутності потреби у високонапірних насосах, що робить їх економічно доцільними для невеликих або допоміжних систем.

Форсунки високого тиску забезпечують значно кращий результат, оскільки утворюють дрібнодисперсний туман, який практично повністю випаровується в повітрі. Це підвищує ефективність охолодження та дозволяє рівномірніше підтримувати вологість без утворення крапель на поверхні рослин. Проте досягнення таких параметрів потребує використання насосного обладнання високого тиску, що збільшує енергоспоживання системи. Незважаючи на це, за рахунок високої ефективності такі

системи часто є оптимальним рішенням для промислових теплиць. Найвищі показники ефективності демонструють гідропневматичні форсунки, які використовують одночасно воду і стиснене повітря. Завдяки цьому досягається найменший розмір крапель і майже повне їх випаровування, що забезпечує максимальний ефект охолодження та найбільш рівномірне зволоження повітря. Такі системи (рис. 3) дозволяють точно регулювати параметри мікроклімату, що особливо важливо для високотехнологічних тепличних комплексів.



а



б

а – змонтований туманоутворювач TurboFog виробництва NDJ; б – розташування обладнання змонтованої системи гідропневматичного туманоутворення.

Рисунок 3 – Монтаж системи туманоутворення гідропневматичного типу

Джерело: розроблено автором

Впровадження та використання гідропневматичних систем супроводжується підвищеними експлуатаційними витратами через необхідність застосування компресорного обладнання. Монтаж цих систем туманоутворення передбачає прокладання трубопроводів подачі повітря та води на оптимально зручній для виконання монтажних робіт та обслуговування висоті (зазвичай це 1,8 – 3 м від поверхні) та розміщення форсунок на відстані між собою 2,5 – 4 м. Це забезпечує рівномірний розподіл створеного розпиленого туману по об'єму приміщення. Подача води може здійснюватися за допомогою системи загального водопостачання [10, 13]. Автоматизація роботи системи за допомогою сучасної автоматики та контролерів (рис. 3, б) спроможна якісно регулювати параметри мікроклімату в залежності від заданих умов.

Висновки. За результатами проведеного аналізу ефективності використання гідропневматичних систем туманоутворення доведено, що мікродисперсне туманоутворення є одним із найбільш ефективних і перспективних способів створення оптимального мікроклімату в тепличних приміщеннях для зеленого живцювання та пророщування. Порівняння шести типів туманоутворювачів за техніко-експлуатаційними характеристиками (робочий тиск, витрата води, розмір краплі, ефективність охолодження та зволоження) показало чітку залежність продуктивності системи від ступеня дисперсності води та повноти її випаровування в повітрі.

Найвищий показник ефективності демонструють гідропневматичні (небулайзерні) системи (4,4 ум. од.) типу TurboFog. Вони забезпечують найменший розмір краплі (3 – 40 мкм), майже повне випаровування води, максимальну рівномірність зволоження та можливість точного регулювання параметрів мікроклімату.

На сьогоднішній день використання приміщення теплиці без комплексної автоматизованої системи контролю стану мікроклімату не є ефективним. Можливість

враховувати взаємозалежність різних параметрів мікроклімату і здійснювати коригування в режимі реального часу для підтримання оптимальних умов вимагає ретельнішого вивчення в подальших дослідженнях. Ці взаємозалежності мають бути сплановані та прораховані для можливості комплексного налаштування всіх систем управління мікрокліматом, щоб забезпечити ефективну роботу теплиці чи спеціалізованого приміщення підтримуючі максимально сприятливі умови розвитку рослин.

Список літератури

1. Perdignes A., García J.L., Romero A., Rodríguez A., Luna L., Raposo C., de la Plaza S. Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 99 (4). P. 573 – 586.
2. Mist and fog equipment for propagation. UMass Extension Greenhouse Floriculture Fact Sheet. *University of Massachusetts* : веб-сайт. URL: <https://www.umass.edu/agriculture-food-environment/greenhouse-floriculture/fact-sheets/mist-fog-equipment-for-propagation> (дата звернення: 12.04.2026).
3. Dole J.M., Wilkins H.F. Mist propagation systems and humidity chambers for the nursery and greenhouse. HLA-6708. *Oklahoma State University Extension*, 2022.
4. Arbel A., Yekutieli O., Barak M. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, No. 1. P. 45–55. DOI: 10.1016/S1537-5110(02)00216-7.
5. Öztürk H. H. Evaporative cooling efficiency of a fogging system for greenhouses. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2003. Vol. 27. P. 1–8.
6. McGaughey R. Propagation Fog System. *Grower Talks*. 2017 February 28.
7. Stadnik M., Burlaka S., Luts P., Kytsenko A. Integration of sensor technologies in the structure scheme of automated greenhouse control. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (113). С. 119 – 126. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-13.
8. High-Pressure Fog Systems in Controlled Environment Agriculture. *MicroCool*. Technical Bulletin. 2024.
9. Benefits of the high pressure fogging technology. *Horti Generation*. 2019 November 18.
10. Туманоутворювачі для теплиць та літніх терас. *AGROVINN* : веб-сайт. URL: <https://agrovinn.com/ua/kapelnyj-poliv/tumanoobrazovateli-dlya-teplic-i-letnih-terras/?srsid=AfmBOoq2Vlaz-xdCM24uC2cv84qhnO6ITZyO8i0NHDoAGKzMufNDQArJ> (дата звернення: 16.03.2026).
11. Система поливу Туман. *СпецПоливСервіс* : веб-сайт. URL: <https://poliv-service.kiev.ua/ua/g105996446-sistema-poliva-tuman> (дата звернення: 16.03.2026).
12. Туманоутворення. *Rain&Fog* : веб-сайт. URL: <http://www.poliv-tuman.com.ua/туманоутворення> (дата звернення: 18.03.2026).
13. Системи туманоутворення та дезінфекції. *Climate Service* : веб-сайт. URL: <https://climateservice.com.ua/product-category/sistemy-tumana-i-dezinfekczii> (дата звернення: 19.03.2026).
14. Бурлака С.А., Луц П.М., Купчук І.М. Оцінка продуктивності та енерговитрат у гідропонії. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 4 (339). С. 290-295. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-46.

References

1. Perdignes, A., García, J.L., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C., & de la Plaza, S. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*, 99(4), 573–586.
2. Mist and fog equipment for propagation. UMass Extension Greenhouse Floriculture Fact Sheet. (n.d.). *University of Massachusetts*. URL: <https://www.umass.edu/agriculture-food-environment/greenhouse-floriculture/fact-sheets/mist-fog-equipment-for-propagation>
3. Dole, J. M., & Wilkins, H. F. (2022). Mist propagation systems and humidity chambers for the nursery and greenhouse (HLA-6708). *Oklahoma State University Extension*.
4. Arbel, A., Yekutieli, O., & Barak, M. (2003). Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*, 84(1), 45–55. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00216-7).

5. Öztürk, H. H. (2003). Evaporative cooling efficiency of a fogging system for greenhouses. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27, 1–8.
6. McGaughey, R. (2017, February 28). Propagation fog system. *GrowerTalks*.
7. Stadnik, M., Burlaka, S., Luts, P., & Kytsenko, A. (2024). Integration of sensor technologies in the structure scheme of automated greenhouse control. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh [Vibrations in engineering and technology]*, 2(113), 119–126. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-13>.
8. MicroCool. (2024). *High-pressure fog systems in controlled environment agriculture* (Technical bulletin).
9. Horti Generation. (2019, November 18). *Benefits of the high pressure fogging technology*.
10. Tumanoutvoriuvachi dlia teplyts ta litnikh teras [Foggers for greenhouses and summer terraces]. (n.d.). AGROVINN. <https://agrovinn.com/ua/kapelnyj-poliv/tumanoobrazovatel-i-dlya-teplic-i-letnih-terras/> [in Ukrainian].
11. Systema polyvu «Tuman» [Mist irrigation system]. (n.d.). SpetsPolyvServis. <https://poliv-service.kiev.ua/ua/g105996446-sistema-poliva-tuman> [in Ukrainian].
12. Tumanoutvorennia [Fog formation]. (n.d.). Rain & Fog. <http://www.poliv-tuman.com.ua/tumanoutvorennia/> [in Ukrainian].
13. Systemy tumanoutvorennia ta dezinfeksii [Misting and disinfection systems]. (n.d.). Climate Service. <https://climateservice.com.ua/product-category/sistemy-tumana-i-dezinfekcii> [in Ukrainian].
14. Burlaka, S. A., Luts, P. M., & Kupchuk, I. M. (2024). Otsinka produktyvnosti ta enerhovytrat u hidroponitsi [Estimating productivity and energy consumption in hydroponics]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky. [Herald of Khmelnytskyi national university: Technical sciences]*, 4(339), 290–295. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-46>. [in Ukrainian].

Pavlo Luts, PhD tech. sci.

Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Evaluation of the Effectiveness of Using Hydropneumatic Fogging Systems in Greenhouses for Cuttings and Germination

The article presents a comprehensive analysis of the effectiveness of using hydropneumatic (nebulizer) fogging systems in comparison with fogging systems of other types to create optimal microclimate conditions in greenhouses during green cuttings or seed germination. The relevance of the study is due to the need to increase the productivity of greenhouse production in conditions of limited water resources, climate change and requirements for high-quality planting material.

The interdependence of the main parameters of the microclimate (temperature, relative humidity of air and soil, ventilation, CO₂ concentration, lighting level) is considered. It is shown that microdispersed (aerosol) irrigation is an indispensable element of modern agricultural technologies, as it provides delicate, uniform moistening, preventing drying out and overmoistening of the substrate, promotes healthy development of the root system and reduces the risk of fungal diseases.

A comparative analysis of six types of foggers with different key technical and operational characteristics was performed: operating pressure, water flow rate, droplet size and cooling and humidification efficiency. Low and medium pressure systems (0.25 – 0.6 MPa) form droplets of 45 – 160 µm and are characterized by partial water deposition on the surface of plants, which limits their effectiveness. High pressure systems (5 – 7 MPa, Ender) create ultra-fine fog (5 – 20 µm), ensuring almost complete evaporation of water in the air, significant water savings (up to 70%) and effective adiabatic cooling (temperature reduction by 5 – 15 °C).

The highest level of dispersion and accuracy of microclimate regulation is demonstrated by hydropneumatic nebulizer systems (TurboFog), which operate on a combination of water (1.2 – 3.0 MPa) and compressed air (0.2 – 0.25 MPa) and form a droplet size of 3 – 40 microns. Such systems provide maximum humidification and cooling efficiency, but are accompanied by the need to use a more complex system with compressor equipment. It has been proven that the use of microdispersed fogging allows you to significantly reduce mechanical stress for cuttings and sprouts, reduce leaf wetting (reducing the risk of pathogens), implement foliar feeding and disinfection, and also easily automate the process using controllers. Comparing the efficiency, it was found that high-pressure systems are often the optimal solution for industrial greenhouses in terms of the ratio "efficiency - cost", while hydropneumatic nebulizer systems are the most promising for high-tech complexes. The choice of the type of system should be based on natural-climatic, economic and physiological factors. Further research will be aimed at developing an intelligent system for automating the creation of a microclimate, taking into account the real-time interdependence and interaction of all parameters.

hydropneumatic system, nebulizer, fogger, microdisperse irrigation, seed germination, green cuttings, greenhouse microclimate, energy efficiency

Одержано (Received) 13.04.2026

Прорецензовано (Reviewed) 18.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 19.06.2026