

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МЕЛЬНИК ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 631.3:631.589.2

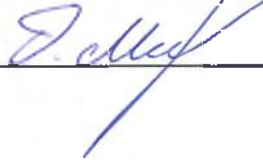
ДИСЕРТАЦІЯ

ОБґРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ

13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.


О. С. Мельник

Науковий керівник:
Купчук Ігор Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Мельник О.С. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів та режимів роботи гідропонної установки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, 2025 р.

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення показників якості вирощування гідропонного салату та мікрозелені шляхом розробки та обґрунтування раціональних параметрів функціональних процесів гідропонної установки. Підвищення показників якості вирощування гідропонної продукції досягається шляхом розробки конструкції восьмигранної призми гідропонної установки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження для її реалізації. Описано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та наведено особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях. Наведено відомості щодо апробації та опублікування результатів наукових досліджень, структуру та обсяг дисертаційного дослідження.

Вирішення цієї мети зведено до розв'язання таких науково-прикладних задач: на основі аналізу відомих технологій та обладнання для гідропонного вирощування аграрної продукції розробити схему багатоярусної гідропонної установки для виробництва салату та мікрозелені; розробити математичну модель записану в параметричній і операторній формі, яка описує та характеризує функціональну зміну процесу мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці залежно від параметрів коренежиттєвого середовища; провести математичне моделювання процесу переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені та визначити його раціональні параметри;

розробити математичну модель роботехнічної платформи з комплексом апаратно-програмного забезпечення автоматизації виробничих процесів гідропонних установок; провести експериментальні дослідження з визначення характеру зміни: показників росту рослин салату гідропонним способом в теплиці залежно від параметрів освітлення; коефіцієнта повноти заповнення поверхні прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від параметрів процесу його переміщення по поверхні лотка; запропонувати структурну схему і математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання та методику розрахунку основних параметрів запропонованих гідропонних установок; визначити економічну ефективність застосування розробленої гідропонної установки в виробничих умовах.

Об'єкт дослідження – технологічний процес вирощування салату й мікрозелені в гідропонній установці.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-технологічних параметрів гідропонної установки на ефективність вирощування салату й мікрозелені.

На основі проведених наукових досліджень обґрунтовано основні раціональні параметри робочих процесів вирощування гідропонного салату та мікрозелені в теплиці. Грунтуючись на цьому вперше розроблено: математичну модель, яка описує функціональну зміну процесу мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці на основі аналізу масообміну складових компонентів коренежиттєвого середовища рослини записану в параметричній і операторній формі; емпіричні моделі, які описують і характеризують зміну показників якості розвитку рослини салату в теплиці (площі листової поверхні та маси листя) залежно від параметрів їх опромінення; дістали подальший розвиток: математична модель функціонального процесу переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені з врахуванням обертання лотка в протилежні сторони; математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання із застосуванням методів механіко–математичного моделювання та числового розв'язку задач з

використанням спеціалізованого програмного забезпечення; уточнено емпіричну модель функціональної зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від вхідних факторів параметрів процесу.

У першому розділі наведено аналіз способів гідропонного вирощування аграрної продукції, конструкцій робочих органів гідропонних установок, а також проаналізовано відомі результати теоретично-експериментальних досліджень процесів гідропонного вирощування салату та мікрозелені.

У другому розділі наведено: опис розробленої гідропонної установки; теоретичний аналіз технологічних процесів мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці залежно від параметрів коренежиттєвого середовища та переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені; математичну модель роботехнічної платформи з комплексом апаратно-програмного забезпечення автоматизації виробничих процесів гідропонних установок.

Пристрій для вирощування гідропонної продукції містить стрижневу конструкцію, яку виконано у формі восьмигранної призми що обертається навколо горизонтальної осі. До вершин стрижнів призми шарнірно прикріплені перфоровані лотки із отворами для гідропонних стаканів. Внизу пристрою змонтовано ємність із розчино-збірниками для живильного розчину рослин.

Розроблена гідропонна установка є багатоярусною конструкцією, на кожному ярусі якої розташований лоток, на якому відбуваються процеси розподілу посівного матеріалу, пророщування та вивантаження вирощеної зеленої гідропонної продукції.

В процесі розробки моделі приймали, що під час мінерального живлення подача мінерального розчину до кореневої системи рослин відбувається періодично крапельним способом. Розчин, що поступає рівномірно розосереджується в поперечному перетині контейнера і рухається вертикально вниз, при цьому частина розчину поглинається (абсорбується) дисперсною твердою фазою рослинного матеріалу, а решта розчину відводиться в дренаж.

З урахуванням зроблених припущень концентрації адсорбенту в живильному розчині та в твердих фазах (кореневої системи), динаміка процесів масообміну описується системами рівнянь збереження та масообміну.

На основі запису рівнянь динаміки у приростах та віднімання рівнянь статички й нехтуванням членами другого порядку, отримано рівняння матеріального балансу для повітря теплиці та для рослинного покриву.

Отримані системи рівнянь та передаточних функцій дозволили побудувати схему лінійної математичної моделі температурного вологісного режиму (повітряного об'єму) теплиці системи трубного опалення в приміщенні закритого ґрунту у вигляді структурної схеми.

У третьому розділі наведено програму, опис експериментальних установок і методику проведення експериментальних досліджень.

Програма проведення експериментальних досліджень процесів вирощування гідропонного салату та мікрозелені у теплиці передбачала виконання таких видів робіт: розробити робототехнічну платформу з комплексом апаратно-програмного забезпечення «Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0», який призначений для дистанційного керування гідропонною установкою; розробити конструктивну схему та виготовити макетний зразок гідропонної установки та провести експериментальні дослідження процесу вирощування салату; виготовити конструкцію одnorусної гідропонної установки з обертовим лотком та провести експериментальні дослідження процесу розосередження насіння по вегетаційній поверхні при вирощуванні мікрозелені.

Загалом для реалізації експериментів було розроблено структурну схему моделі проведення експериментальних досліджень на основі базових принципів поняття «чорної скрині». Для проведення експериментальних досліджень процесу вирощування гідропонного салату було застосовано лабораторну гідропонну установку, яку виконано за принципом восьмигранної призми, до вершин якої на осях встановлено гідропонні перфоровані лотки з отворами в які встановлено гідропонні стакани.

Для обґрунтування основних параметрів і режимів роботи багатоярусної гідропонної установки провели експериментальні дослідження з визначення характеру зміни показників росту рослин салату гідропонним способом.

При цьому визначали функціональний характер зміни площі листової поверхні рослини, яку позначили індексом $S_{лс}$ (см²) та маси листя $M_{лс}$ (г) залежно від встановлених факторів.

В якості вхідних факторів було використано – час опромінення (фотоперіод) на трьох рівнях: $T_o = 8; 16; 24$ години на добу, а також величину опромінення $E_o = 10; 20; 30$ Вт/м², тобто реалізовано двофакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами ПФЕ 3².

Для проведення експериментальних досліджень процесу вирощування гідропонного салату було застосовано лабораторну установку карусельного типу з шарнірно підвішеними лотками. Експериментальна установка для дослідження процесу вирощування мікрозелені являє собою одноярусну конструкцію, встановлену на жорсткому каркасі з тягою та приводним механізмом.

Для обґрунтування основних параметрів і режимів роботи експериментальної установки провели експериментальні дослідження з визначення характеру зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні лотка посівним матеріалом залежно від встановлених факторів.

Змінними вхідними факторами під час проведення експериментальних досліджень приймали: вологість зерна (посівного матеріалу) w_z %; кут відхилення лотка $\alpha_{л}$, град.; кількість коливань лотка $n_{л}$, разів.

Контрольовані показники якості, або показники параметрів оптимізації визначали згідно з стандартними методиками, за результатами яких формували порівняльну таблицю.

Методика проведення експериментальних досліджень базувалася на основі наукових методів планування та реалізації планованих факторних експериментів з метою отримання рівнянь регресії параметру оптимізації.

Обробку експериментального масиву даних проводили за загальновідомими методами розрахунку з використанням методик регресійного та кореляційного аналізу.

У четвертому розділі наведено результати реалізації програми експериментальних досліджень.

В основу розробки робототехнічної платформи з комплексом апаратно-програмного забезпечення «Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0» закладено принцип збільшення вепольності системи шляхом відокремлення частини функцій блока адаптивного керування, а саме прийому, структуризації та первинної обробки вхідної інформації отриманої в результаті моніторингу та покладення їх виконання на апаратну частину, що змонтована на мобільному шасі.

Підґрунтям для функціонування перелічених інструментів є спеціалізоване програмне та апаратне забезпечення.

На основі обробки експериментального масиву даних отримано рівняння регресії, які описують функціональну зміну: площі листової поверхні $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату; коефіцієнта заповнення k_z площі лотка насінням сочевиці.

Встановлено, що за зміни часу опромінення T_o та інтенсивності опромінення E_o рослин відповідно, в діапазоні від 8 до 24 год. та від 10 до 30 Вт/м² площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази.

Значне збільшення площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату (майже в 1,6 рази – від 500 до 850 см²) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 40...50 см².

Значне збільшення маси листя $M_{лс}$ рослин салату (майже в 3 рази – від 5 до 15 г) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт

год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст маси листя $M_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 1,5...2,0 г.

Встановлено, що за зміни кута нахилу α_l лотка в діапазоні від 10 до 30 град. та кількості коливань n_l лотка в діапазоні від 1 до 5 раз коефіцієнт заповнення k_z площі лотка насінням сочевиці збільшується в середньому в 1,2...1,5 рази.

Функціональна зміна вологості зерна w_z в межах збільшення від 14 до 18 % призводить до зменшення коефіцієнта заповнення k_z площі лотка насінням сочевиці, але суттєво не впливає на зміну значення коефіцієнта заповнення k_z . При цьому коефіцієнт заповнення k_z зменшується: при $n_l = 1$ раз в середньому на 0,2; при $n_l = 3$ рази в середньому на 0,2; при $n_l = 5$ раз в середньому на 0,3.

У п'ятому розділі наведено шляхи подальшого удосконалення робочих процесів і робочих органів гідропонних установок і розрахований економічний ефект від застосування гідропонної установки запропонованої конструкції.

Ключові слова: гідропонний метод, живлення, крапельне зрошення, фотосинтез, гідропоніка, мікротрубка, енергоефективність, продуктивність, поживний розчин, добрива, мінеральний розчин, установка, маса рослин, площа листя, коренева система.

ABSTRACT

Melnyk O.S. Substantiation of rational design parameters and operating modes of the hydroponic installation. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 Mechanical Engineering in the specialty 133 Industrial Mechanical Engineering. Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2025.

The dissertation solves a new scientific problem of improving the quality of growing hydroponic lettuce and microgreens by developing and substantiating rational parameters of the functional processes of the hydroponic installation. Improving the quality of growing hydroponic products is achieved by improving the design of the octahedral prism of the hydroponic installation.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and objectives of the research for its implementation. The manuscript describes the scientific novelty, practical significance of the results obtained, and presents the applicant's personal contribution to the research conducted. Also, the manuscript provides information on the testing and publication of the scientific research results, the structure and scope of the dissertation research.

The solution of this goal leads to solving the following scientific and applied problems: based on the analysis of the known technologies and equipment for hydroponic cultivation of agricultural products to develop a scheme for an improved multi-tiered hydroponic installation for the production of lettuce and microgreens; to develop a mathematical model written in parametric and operator form, which describes and characterizes the functional change in the process of mineral nutrition of plants during the cultivation of hydroponic lettuce in a greenhouse depending on the parameters of the root environment; to conduct mathematical modeling of the process of moving seed material along the smooth surface of a rectangular tray during the cultivation of hydroponic microgreens and determine its rational parameters; to develop a mathematical model of a robotic platform with a complex of hardware and software for automating production processes of hydroponic installations; to conduct

experimental studies to determine the nature of changes in: growth indicators of lettuce plants hydroponically in a greenhouse depending on lighting parameters and coefficient of completeness of filling the surface of a rectangular tray with seed material depending on the parameters of the process of its movement along the surface of the tray; to propose a structural diagram and mathematical description of the system of automated functioning of modern hydroponic equipment and a method for calculating the main parameters of the proposed hydroponic installations; to determine the economic efficiency of using an improved hydroponic installation in production conditions.

The object of the research is a technological processes of growing lettuce and microgreens in a hydroponic installation.

The subject of the study is the influence of structural and technological parameters of the hydroponic installation on the yield of lettuce and microgreens.

Based on the conducted scientific research, the main rational parameters of the work processes for growing hydroponic lettuce and microgreens in a greenhouse were substantiated. Based on this, the following tasks were developed for the first time: a mathematical model that describes the functional change in the process of mineral nutrition of plants during the cultivation of hydroponic lettuce in a greenhouse based on the analysis of mass exchange of the components of the plant's root environment recorded in parametric and operator form; empirical models that describe and characterize the change in the quality indicators of lettuce plant development in a greenhouse (leaf surface area and leaf mass) depending on the parameters of their irradiation. Also such tasks have received further development: a mathematical model of the functional process of moving seed material along the smooth surface of a rectangular tray during the cultivation of microgreens, taking into account the rotation of the tray in opposite directions; mathematical description of the automated functioning system of modern hydroponic equipment using the methods of mechanical and mathematical modeling and numerical solution of problems using specialized software; the empirical model of the functional change in the coefficient of completeness of filling the surface of a rectangular tray with seed material depending on the input factors of the process parameters.

The first section provides an analysis of the methods for hydroponic cultivation of agricultural products, designs of the working bodies of hydroponic installations, and also the known results of theoretical and experimental studies of the processes of hydroponic cultivation of lettuce and microgreens are analyzed.

The second section provides: a description of an improved hydroponic installation; a theoretical analysis of the technological processes of mineral nutrition of the plants during the cultivation of hydroponic lettuce in a greenhouse depending on the parameters of the root environment and the movement of seed material along the smooth surface of a rectangular tray during the cultivation of microgreens; a mathematical model of a robotic platform with a complex of hardware and software for the automation of production processes of hydroponic installations.

The device for growing hydroponic products contains a rod structure, which is made in the form of an octahedral prism rotating around a horizontal axis. Perforated trays with holes for hydroponic cups are hingedly attached to the tops of the prism rods. A container with solution collectors for plant nutrient solution is mounted at the bottom of the device.

The developed hydroponic installation is a multi-tiered structure, each tier of which has a tray on which the processes of seed distribution, germination, and unloading of grown green hydroponic products take place.

In the process of developing of the model, it was assumed that during mineral nutrition, the supply of mineral solution to the root system of plants occurs periodically by drip method. The incoming solution is evenly dispersed in the cross section of the container and moves vertically downwards, while part of the solution is absorbed by the dispersed solid phase of the plant material, and the rest of the solution is drained into the drainage. Taking into account the assumptions made regarding the concentration of the adsorbent in the nutrient solution and in the solid phases (root system), the dynamics of mass transfer processes is described by the systems of conservation and mass transfer equations. Based on writing the dynamics equations in increments and subtracting the static equations and neglecting of second-order terms, the material balance equation for greenhouse air and vegetation cover was obtained.

The obtained systems of equations and transfer functions allowed us to construct a diagram of a linear mathematical model of the temperature and humidity regime (air volume) of a greenhouse with a pipe heating system in a closed ground room in the form of a structural diagram.

The third section provides the program, description of the experimental setup, and the methodology for conducting the experimental research.

The program for conducting the experimental research on the processes of growing hydroponic lettuce and microgreens in a greenhouse included the following types of work: to develop a robotic platform with a hardware and software complex "Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0", which is designed for remote control of a hydroponic installation; to develop a design scheme and manufacture a prototype of an improved hydroponic installation and conduct the experimental research on the process of growing lettuce; to manufacture a single-tier hydroponic system with a rotating tray and conduct experimental studies of the dispersion process on the plant surface when growing microgreens.

In general, for the implementation of the experiments, a structural diagram of a model for conducting experimental research was developed based on the basic principles of the "black box" concept. In order to conduct the experimental research on the process of growing hydroponic lettuce, a laboratory hydroponic installation was used, which was made according to the principle of an octahedral prism, with hydroponic perforated trays with holes in which hydroponic cups were installed at the vertices on the axes.

In order to substantiate the main parameters and operating modes of a multi-tiered hydroponic installation, experimental studies were conducted to determine the nature of the changes in lettuce plant growth indicators using the hydroponic method.

At the same time, the functional nature of the change in the area of the plant's leaf surface, which was designated by the index $S_{\text{лс}}$ (cm²), and leaf mass $M_{\text{лс}}$ (g), depending on the established factors, was determined.

The input factors which had been used were the irradiation time (photoperiod) at three levels $T_o = 8; 16; 24$ hours per day, as well as the irradiation value $E_o = 10; 20; 30$ W/m², i.e. a two-factor experiment was implemented at three levels of

variation by the PFE 3².

In order to conduct the experimental studies of the process of growing hydroponic lettuce, a laboratory installation with a rotating tray was used. The experimental installation is a single-tier structure mounted on a rigid frame with a traction and drive mechanism.

In order to substantiate the main parameters and operating modes of the experimental installation, the experimental studies were conducted to determine the nature of the change in the coefficient of completeness of filling the tray surface with seed material depending on the established factors. The following variable input factors were taken into account during the experimental studies: grain (seed) moisture content, w_3 %; tray deflection angle α_n , degrees; number of tray oscillations n_n times.

Controlled quality indicators, or indicators of the optimization parameters, were determined according to standard methods, the results of which were used to form a comparative table.

The methodology for conducting the experimental research was based on the scientific methods of planning and implementing of planned factorial experiments in order to obtain regression equations for the optimization parameter.

The experimental data set was processed using well-known calculation methods using regression and correlation analysis techniques.

The fourth section presents the results of the implementation of the experimental research program.

The development of a robotic platform with a hardware and software complex “Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0” is based on the principle of increasing the system's functionality by separating part of the functions of the adaptive control unit, namely the reception, structuring and primary processing of input information obtained as a result of monitoring and assigning their execution to the hardware part mounted on the mobile chassis. The basis for the functioning of the listed tools is specialized software and hardware.

Based on the processing of the experimental data set, regression equations were obtained that describe the functional change in: leaf surface area S_{lc} and leaf mass M_{lc} of lettuce plants; tray area filling coefficient k_3 with lentil grain.

It was found that with the changes in the irradiation time T_o and intensity of plant irradiation E_o , respectively, in the range from 8 to 24 hours and from 10 to 30 W/m², the leaf surface area S_{lc} of lettuce plants increases on average by 1.7...3.2 times.

A significant increase in the leaf surface area S_{lc} of lettuce plants (almost 1.6 times – from 500 to 850 cm²) is observed at an irradiation dose H_o , greater than 350 W h/m², while within the range of the changes in the irradiation dose of 480–720 W h/m², the increase in the leaf surface area of lettuce plants is insignificant – on average by 40...50 cm².

A significant increase in the mass of lettuce leaves (almost 3 times – from 5 to 15 g) is observed at an irradiation dose greater than 350 W h/m², while within the range of the changes in the irradiation dose of 480–720 W h/m², the increase in the mass of lettuce leaves is insignificant – on average by 1.5...2.0 g.

It was established that when α_n the tray inclination angle changes in the range from 10 to 30 degrees and the number n_n of the tray oscillations in the range from 1 to 5 times, the coefficient of filling k_3 the tray area with lentil grains increases on average by 1.2...1.5 times.

Functional change in grain moisture w_3 within the range of increase from 14 to 18% leads to a decrease in the filling coefficient k_3 of the tray area with lentil grain, but does not significantly affect the change in the filling coefficient value. In this case, the filling coefficient decreases k_3 : at $n_n = 1$ time on average by 0.2; at $n_n = 3$ times on average by 0.2; at $n_n = 5$ times on average by 0.3.

The fifth section presents ways to further improvement of the working processes and working elements of hydroponic installations and calculates the economic effect of the using of an improved hydroponic installation.

Keywords: hydroponic method, nutrition, drip irrigation, photosynthesis, hydroponics, microtube, energy efficiency, productivity, nutrient solution, fertilizers, mineral solution, installation, plant mass, leaf area, root system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (Index Copernicus)

1. Sevostianov I., **Melnyk O.** Elaboration of improved hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 66–75. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-7. (0,92 друк. арк., особистий внесок: наведено аналіз способів вирощування гідропонної продукції та визначені шляхи удосконалення конструкторських схем гідропонних установок – 0,72 друк. арк.).

2. Севостьянов І.В., **Мельник О.С.** Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 119–128. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-13. (0,88 друк. арк., особистий внесок: запропоновано удосконалену конструкцію установки для вирощування сільськогосподарської продукції в теплиці – 0,62 друк. арк.).

3. Sevostianov I., **Melnyk O.** Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 61-67. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-7. (0,78 друк. арк., особистий внесок: здійснено аналіз пристроїв контролю подачі живильного розчину в гідропонних установках – 0,64 друк. арк.).

4. Sevostianov I., **Melnyk O.** Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2(105). С. 76–83. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-8. (0,82 друк. арк., особистий внесок: розроблено структурну схему і математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання – 0,62 друк. арк.).

5. Солона О.В., **Мельник О.С.**, Грищенко В.О. Моделювання системи мінерального живлення рослин в закритому ґрунті. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3(106). С. 72–77. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-10. (0,82 друк. арк., особистий внесок: розроблено модель мінерального живлення кореневої системи рослин під час вирощування салату в теплиці – 0,62 друк. арк.).

6. Купчук І.М., Мельник О.С. Математичне моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослинної продукції в гідропонній установці. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 1 (331). С. 83–88. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-14. (0,75 друк. арк., особистий внесок: отримано математичні моделі у вигляді рівняння регресії, що дозволяють прогнозувати розміри та масу листків салату залежності від випромінення – 0,6 друк. арк.).

Об'єкти права інтелектуальної власності

7. Гончарук І.В., Купчук І.М., Солоня О.В., Мельник О.С. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідчення № 103284 від 18.03.2021 р. ; заяв. с202101016 від 22.02.2021 р.

8. Солоня О.В., Мельник О.С. Пристрій для вирощування гідропонної продукції. Патент України на корисну модель № 153587, Україна. МПК (2023.01) А01G 31/02 (2006.01) А01G 31/06 (2006.01) А01G 29/00. №а202101002; заявл. 01.03.2021 р.; опубл. 26.07.2023 р., Бюл. № 30.

Матеріали конференцій

9. Мельник О.С. Моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослин в гідропонній установці : тези доп. Міжн. наук.-практичної конф. «Сучасні вектори розвитку аграрної науки». Херсон, 17-18 вересня 2024 р. С. 847-851.

10. Мельник О.С. Дослідження розробленого апарату управління гідропонними установками : тези доп. VI-ї Всеукр. наук.-практичної конф. «Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України. Київ, 25-26 вересня 2024 р. С. 51–54.

11. Мельник О.С. Методологія проведення експериментальних досліджень гідропонної установки : тези доп. XIII Міжн. нак.-техн. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль, ТНТУ ім. І Пулюя, 11-12 грудня 2024 р. С. 172–173.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІДРОПОННОГО ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР	24
1.1. Основні положення гідропоніки	24
1.2. Аналіз методів і систем гідропоніки та існуючих конструкцій гідропонних установок	33
1.2.1. Методи та системи гідропоніки	33
1.2.2. Аналіз відомих конструкцій гідропонних установок	47
1.2.3. Аналіз систем керування гідропонним обладнанням	53
1.3. Аналіз теоретично-експериментальних досліджень процесів роботи гідропонних установок	63
1.4. Висновки, мета та завдання досліджень.....	68
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОЯРУСНОЇ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ	71
2.1. Будова та принцип роботи багатоярусної гідропонної установки	71
2.2. Моделювання процесу мінерального живлення рослин під час вирощування салату гідропонним методом.....	76
2.3. Математична модель процесу переміщення посівного матеріалу в прямокутному лотку гідропонної установки	90
2.3. Висновки до розділу.....	101
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ	103
3.1. Програма та об'єкт експериментальних досліджень	103
3.2. Методологія проведення експериментальних досліджень багатоярусної гідропонної установки.....	107

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу розподілення посівного матеріалу в лотку.....	111
3.4. Висновки до розділу	116
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБЛЕНОЇ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ.....	117
4.1. Розробка робототехнічної платформи з комплексом апаратно-програмного забезпечення	117
4.2. Результати експериментальних досліджень багаторівневої гідропонної установки	123
4.3. Результати експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта заповнення площі поверхні лотка	133
4.4. Висновки до розділу	143
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	145
5.1. Шляхи подальшого удосконалення гідропонних установок	145
5.2. Методика розрахунку основних технологічних параметрів процесу роботи гідропонних установок	161
5.3. Впровадження результатів дослідження.....	168
5.4. Економічна ефективність вирощування сільськогосподарської продукції з використанням багаторівневої гідропонної установки.....	170
5.5. Висновки до розділу.....	176
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	180
ДОДАТКИ	201

ВСТУП

Актуальність дослідження. Актуальними завданнями сільського господарства України та інших держав є підвищення урожайності сільськогосподарських культур, збільшення харчової цінності, якості та зниження собівартості продукції, зменшення виробничих площ тощо, що сприяє підвищенню рентабельності виробництва аграрної продукції.

У зв'язку із цим досить перспективним напрямком є застосування гідропонних установок, які при мінімальних займаних площах, капітальних та експлуатаційних витратах забезпечують майже в два рази скорочення періоду цілодобового вирощування широкої номенклатури сільськогосподарських культур і підвищення їх урожайності.

Останнім часом удосконаленню гідропонних установок приділяється багато уваги в напрямку підвищення ефективності підведення живильного розчину, зменшення габаритів та витрат енергії. Проте підвищення ефективності виробництва гідропонної продукції неможливе без подальшої реалізації науково-обґрунтованої методики проєктного розрахунку гідропонних установок та пов'язаного з цим удосконаленого робочого процесу.

Тому розроблення багатоярусних конструкцій гідропонних установок і проведення наукових теоретичних і експериментальних досліджень з визначення функціонального впливу параметрів робочих органів для підвищення ефективності функціонування гідропонного обладнання є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у Вінницькому національному аграрному університеті, а основну частину одержаних результатів отримано в рамках виконання ініціативних науково-дослідних робіт: «Інтенсифікація процесів механічної обробки сільськогосподарської сировини за вібраційного впливу» (№ РК 0117U004700, період виконання 2017-2022 рр.) та «Високоєфективне обладнання для здійснення масо- та теплообмінних процесів у харчовій та

переробній галузі» (№ РК 0122U002098, період виконання 2022-2026 рр.).

Мета та завдання досліджень. Метою дослідження є підвищення ефективності вирощування рослин гідропонним методом шляхом розробки конструкції та обґрунтування параметрів багатоярусної установки.

Реалізація цієї мети передбачає наукове розв'язання таких **завдань**:

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для гідропонного вирощування аграрної продукції розробити схему багатоярусної гідропонної установки для вирощування салату та мікрозелені.

2. Розробити математичну модель процесу, яка описує та встановлює функціональну зміну мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці залежно від параметрів коренежиттєвого середовища, записану в аналітичній і операторній формі.

3. Провести математичне моделювання процесу переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені гідропонним способом та визначити його раціональні параметри.

4. Провести експериментальні дослідження:

- з визначення характеру зміни показників росту рослин салату за використання гідропонного способу вирощування в теплиці залежно від параметрів освітлення;

- з визначення характеру зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від параметрів процесу його переміщення по поверхні лотка.

5. Запропонувати структурну схему і математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання та методику розрахунку основних параметрів запропонованих гідропонних установок.

6. Визначити економічну ефективність застосування розробленої багатоярусної гідропонної установки у виробничих умовах.

Об'єкт дослідження – технологічний процес вирощування салату й мікрозелені в гідропонній установці.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-технологічних параметрів гідропонної установки на ефективність вирощування салату й мікрозелені.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження гідропонного вирощування салату та мікрозелені в теплиці проводили на основі моделювання процесу мінерального живлення коріння рослин салату та переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка з використанням основних положень класичної механіки, механіки сипучого середовища, вищої математики, теорії машин і механізмів.

Експериментальні дослідження макетних зразків гідропонних установок проводили в лабораторних умовах, які реалізовано на основі застосування відомих положень методики планування та обробки факторних експериментів. Теоретичні розрахунки, статистичну обробку експериментального масиву даних та аналіз отриманих результатів проводили з застосуванням прикладного програмного забезпечення для персонального комп'ютера.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі проведеного комплексу наукових досліджень обґрунтовано удосконалену конструкцію та основні параметри робочих процесів гідропонних установок під час вирощування салату й мікрозелені в теплиці.

Уперше:

- розроблено математичну модель, яка описує функціональну зміну процесу мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці на основі аналізу масообміну складових компонентів коренежиттєвого середовища рослини записану в параметричній і операторній формі;

- розроблено емпіричні моделі, які описують і характеризують зміну показників якості розвитку рослини салату в теплиці (площі листової поверхні та маси листя) залежно від параметрів їх опромінення;

Набули подальшого розвитку:

- математична модель функціонального процесу переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені гідропонним способом із врахуванням обертання лотка в

протилежні сторони;

- математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання із застосуванням методів механіко-математичного моделювання та числового розв'язку задач з використанням програмного забезпечення для персонального комп'ютера;
- емпірична модель функціональної зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від вхідних факторів параметрів процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Результати експериментальних та теоретичних досліджень щодо розробки структури та алгоритмів роботи автоматизованої системи керування режимними параметрами гідропонної установки використовуються у навчальному процесі Вінницького національного аграрного університету при викладанні навчальних дисциплін «Мехатроніка і мобільна робототехніка» та «Система точного землеробства». Розроблена багаторівнева гідропонна установка проходила виробничу перевірку на базі ПСП «Агрофірма Нападівська» (с. Нападівка, Вінницький район, Вінницька область). Дослідження проводили на гідропонних модулях, розділених світлонепроникними екранами, які не дозволяють проникати світлу в сусідні секції але забезпечують циркуляцію повітряних потоків, в лабораторному приміщенні без природного освітлення. Результати досліджень підтвердили технологічну ефективність застосування розробленої багаторівневої гідропонної установки в виробничих умовах під час вирощування салату в теплиці. Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (м. Калинівка, Вінницька область) отримало конструкторську і технологічну документацію для виготовлення дослідних зразків гідропонних установок для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримав результати теоретичних і експериментальних досліджень, що подаються на захист. Формулювання мети, завдань та аналіз одержаних результатів були виконані спільно з науковим керівником та частково за участю співавторів публікацій.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи та цифровізація агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку» (27-28 жовтня 2021 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи» (20-21 жовтня 2022 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні вектори розвитку аграрної науки» (17-18 вересня 2024 р., ХДАЕУ, м. Херсон, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України: вчора, сьогодні, завтра» (25-26 вересня 2024 р., НААН України, м. Київ, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів» (17-18 жовтня 2024 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2024 р., ТНТУ ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна).

Публікації. Основні результати досліджень за темою дисертації опубліковано в 11 наукових працях, у тому числі 6 статей наукових фахових виданнях України (категорії Б); 1 патент України на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір, 3 тези у збірнику доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури із 200 найменувань на 19 сторінках і 13 додатків на 17 сторінках. Основні результати роботи викладено на 177 сторінках, де містяться 87 рисунків і 9 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 219 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІДРОПОННОГО ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

1.1. Основні положення гідропоніки

Гідропоніка є перспективним напрямком розвитку сучасного сільського господарства, що забезпечує багаторічне вирощування основних видів овочів та зелених насаджень на невеликих площах з мінімальними витратами води та добрив. Ця технологія дозволяє отримати досить великий урожай свіжих овочів в межах великих міст, включаючи офісні та житлові приміщення [1, 2].

Підприємці та дослідники приділяють багато уваги розробці більш ефективних методів гідропоніки та обладнання для їх реалізації у напрямку зменшення корисних площ, економії води, поживних речовин та збільшення подачі повітря та потужностей установок [3].

У процесі звичайного, або наявного методу проростання насіння сільськогосподарських культур, рослини отримують вуглець і кисень з повітря, решта елементів – з ґрунту, а у разі застосування гідропоніки – з живильного розчину.

Поживні елементи – це азот, фосфор, калій, кальцій, залізо та багато інших, зокрема, мікроелементи. Вони потрібні рослинам і не можуть бути замінені нічим іншим.

Поживні речовини – це сполуки, які містять ці елементи. Відомо, що у ґрунті поживні елементи містяться у чотирьох формах: міцно фіксовані ґрунтом і недоступні для рослин; важкорозчинні неорганічні солі; адсорбовані на поверхні колоїдів та доступні для рослин завдяки іонному обміну; розчинені у питній воді легко доступні для рослин [1].

За поглинання живильних елементів із ґрунту або живильного розчину відповідає коренева система. Основною зоною поглинання поживних речовин є зона розтягування (зростання) та зона корневих волосків. Вона ж забезпечує необхідними речовинами і надземне коріння рослин.

Підраховано, що на 1 мм² кореневої поверхні розвивається від 200 до 400 кореневих волосків, що дозволяє кореневій поверхні збільшуватися у сотні разів. Кореневі волоски мають підвищену здатність до поглинання.

У меристематичній зоні (меристема - це тканина, з якої утворюються інші види тканин кореня) відсутня диференційована судинна система. При цьому флоема диференціюється раніше, і лише вище за довжиною кореня спостерігається утворення ксилеми. Саме по ній і пересувається вода із розчиненими поживними речовинами. Основна маса іонів, поглинених меристемою, використовується саме у цих клітинах. Деяка кількість іонів, особливо Ca^{2+} , надходить із цієї зони до надземних органів рослин. Поглинені в зоні розтягування та в зоні кореневих волосків іони транспортуються як вгору, так і вниз коренем. Вище зони кореневих волосків розташована зона розгалуження кореня. Тут поверхня покривається міцним пробковим шаром і в поглинанні поживних речовин участі практично не бере.

Різні зони кореня відповідають за поглинання різних мінеральних елементів. Встановлено, що Ca^{2+} надходить у апікальні зони, K^+ , NH_4 , фосфати адсорбуються усією поверхнею кореневої системи [3].

При вирощуванні рослин без ґрунту використовують різні субстрати, агроперліти, вермікуліти, мінеральну вату. Найчастіше це місцеві матеріали. У будь-якому випадку субстрат повинен відповідати таким вимогам:

1. Не містити отруйних речовин і бути хімічно нейтральним або інертним до живильного розчину, інакше змінюватимуться фізико-хімічні властивості живильного розчину, що негативно позначиться на розвитку рослин. Зокрема субстрат не повинен містити карбонату кальцію (CaCO_3). Дане з'єднання сприяє підвищенню лужної реакції живильного розчину та викликає осадження фосфатів.

2. Мати достатню водоутримуючу здатність та гарну аерацію. Ці властивості залежить від розміру часток. Чим більше частинки, тим менша водоутримуюча здатність і вища пористість. Наприклад, подрібнений вермікуліт, перліт та керамзит добре утримують воду, а гравій та гранітний щебінь – погано.

3. Субстрат повинен мати достатню міцність. Вермикуліт, керамзит, перліт не відповідають цій вимозі й з часом кришаться. Це погіршує аерацію кореневої системи та економічно не вигідно, оскільки подібні субстрати вимагають часті заміни.

При виборі необхідно враховувати, що при тривалій експлуатації субстрати піддаються фізико-хімічним змінам під дією як живильного розчину, а й корневих виділень і різних мікроорганізмів.

Субстратом для гідропоніки можуть бути гранітний щебінь, подрібнений керамзит, спучений вермикуліт, перліт, кам'яновугільний шлак, поліхлорвініловий субстрат. Іноді застосовують органічні субстрати: мох, тирсу, торф. Кожен із вище перелічених матеріалів має свої переваги та недоліки.

У зв'язку з цим був розроблений матеріал, що найбільш відповідає вимогам до субстратів гідропоніки, – гродан (мінеральна вата). Також як субстрат іноді використовують високомолекулярні синтетичні сполуки: спінений полістирол, поліуретан, термопластичні полімери, синтетичні пінисті смоли.

Агроперліт – високоефективна розпушуюча добавка до ґрунту, що покращує її структуру та підвищує продуктивність.

Агроперліт є інертною речовиною, він хімічно стійкий, не злежується і не кришиться, легко змішується з іншими компонентами, має велику поверхню, завдяки чому утримують вологу в 3–4 рази більше власної ваги, має прекрасні теплоізоляційні властивості. У зв'язку з цим спучений перліт, завдяки своїм характеристикам, є чудовим матеріалом для кондиціонування ґрунту.

Агроперліт застосовується в тепличному господарстві для створення ґрунтових субстратів, для газонів стадіонів, для благоустрою міських газонів, полів для гольфу, тенісних кортів, а також для вирощування на стаціонарних майданчиках дернового шару для озеленення територій, вирощування саджанців, для черенкування квітів, вирощування овочевих та зелених культур на гідропоніці, зберігання коренеплодів.

Перліт стає все більш популярним матеріалом, особливо, у людей, що займаються сільським господарством. У класичному сільському господарстві його використовують для підвищення повітропроникності ґрунту, для покращення його структури, для мульчування. Дуже хороший перліт і для вирощування квітів, оскільки це досить стерильне середовище.

Перліт є ідеальним середовищем для укорінення рослин із слабкою кореневою системою. Варто відзначити, що перліт дуже бідний і в ньому практично немає поживних елементів, так само він позбавлений будь-яких органічних сполук, і це його найголовніша перевага. Тому можна зробити висновок, що всі речовини знаходяться у зв'язаній формі і рослина не може їх засвоювати. А вермікуліт, наприклад, містить солі магнію та калію, у легко доступній формі для рослин. Тому дуже часто рекомендують використовувати їх суміш.

Склад перліту такий: двооксид кремнію 71,1; оксид алюмінію 14,1; оксид магнію 0,1; оксид кальцію 0,4; оксид заліза 0,8; оксид кальцію 3,7.

Рослина отримує живлення з води, в якій розчинені різні солі. Середовище, в якому росте рослина, повинно добре вбирати воду, утримувати її і віддавати. Перліт в даному випадку не замінний, він виграє у таких субстратів як мінеральна вата та пінополістирол. При поливі суміші з перлітом вона дуже швидко вбирає вологу і кожна частинка перліту є міні резервуаром із запасом води, до того ж ці частинки легко діляться вологою із сусідніми такими ж частинками.

Якщо у ґрунт був доданий перліт, то на ньому не утворюється підсохла кірка, так як частинки перліту весь час постачатимуть верхній шар вологою. Ще не менш корисною властивістю є його колір, а він, як нам відомо, білий.

Це дає хорошу відбиваючу здатність падаючої світлової та теплової енергії, за рахунок чого забезпечується відмінна підтримка температурного режиму у субстраті.

Отже, можемо констатувати, що: перліт здатний поглинати води в 4 разів більше за свою масу; відмінний доступ до коренів повітря та розчину; у ньому не ростуть бур'яни, не заводяться комахи і практично ніколи не буває хвороб у

рослини; низький рН; через відсутність органіки та її стерильності він не схильний до гниття; у сухому вигляді він дуже легкий; відмінні показники при пророщуванні насіння та вигонці розсади.

Вермикуліт – це мінерал. Зовні він є світло-сірого кольору руду, з великими фракціями чистої слюди. Як великі фракції руди, так і середні і дрібні являють собою багатошарову речовину, але ще не придатну для використання у сумішах. У руді також багато досить дрібних фракцій.

Руду переробляють на заводах. Чиста слюда відбирається, сортується і переправляється потреб електротехнічної промисловості, а решта руди обробляється гідротермічно в конвеєрних печах, за високої температури (760°C). При такій обробці частки руди розшаровуються та спучуються.

Вермикуліт – вторинний мінерал з групи гідрослюд, що є сумішшю декількох мінералів. З хімічної точки зору, вермикуліт – це «гідрат магнію-амонію-алюмінію-заліза і кремнію».

Залежно від розмірів фракцій мінералу вермікуліт поділяється за номерами – від 1 це розмір з горошину, до 5 – фракції піску та пилу.

У вермикуліті залишається ще чимало чистої слюди. Не фракціонований вермикуліт використовується як утеплювач у будівництві, де його засипають у порожнечі. У гідропоніці використовують фракції 4.

Вермикуліт, особливо у сухому вигляді, дуже легкий матеріал і як легкий розпушувач, він забезпечує наявність у субстраті великої кількості повітря.

Придатність субстрату для гідропонного вирощування визначають такі його якості як легкість, стерильність, хімічна інертність, повітроємність, буферність, міцність, вологоємність, довговічність використання.

Вперше застосував вермікуліт у гідропоніці професор Муллард (Велика Британія). Він проводив досліди з вирощування гвоздики на суміші піску з вермикулітом. Пізніше у Південній Африці використання цього субстрату дозволило підвищити врожайність рослин у 5-15 разів [4].

У гідропоніці використовують лише спучений вермикуліт. Після випалу щільність вермікуліту знижується до 300 кг/м^3 . Субстрат утримує воду, в 5-6

разів більшу за себе за вагою. При цьому він легко поглинає та віддає рослинам вологу. Висока повітроємність забезпечує сильний розвиток кореневої системи у рослин [5, 6].

Завдяки наявності наскрізних щілинних пор, поживний розчин може безперешкодно проходити крізь субстрат, при цьому вермикуліт, на відміну від керамзиту, не спливає і не травмує коріння рослин.

Одна з переваг вермикуліту – його висока міцність. Його можна використовувати більше 10 років без заміни. Він підходить для організації зеленого конвеєра та вирощування багаторічних рослин без пересадки.

Ще одна властивість вермикуліту – він не схильний до засолення. Найчастіше субстрати для гідропоніки за 2–3 роки накопичують солі та стають малопридатними для вирощування рослин. У вермикуліті утворюються переважно добре розчинні речовини: хлористий кальцій та магній. Які легко вимиваються звичайною водою або надлишком живильного розчину.

При вирощуванні рослин на вермикуліті дренаж не є обов'язковим. Можна на дно ємностей помістити великі фракції вермикуліту шаром 4-5 см, а вище насипати дрібнішу фракцію шаром 20-25 см [7].

Вермикулітопоніка – екологічне виробництво. Субстрат насичується поживним розчином один раз на 10 днів або навіть рідше. Розчини відповідають періодам розвитку рослини. Приготовлений розчин повністю витрачається і не йде до дренажу. У тканинах рослини не накопичуються нітрати, як часто відбувається при вирощуванні на ґрунті.

Вермикулітопоніка знайшла широке застосування у багатьох країнах. Вермикуліт вважається хорошим середовищем і дозволяє заощаджувати живильний розчин у 10-15 разів. З вермикулітом легко працювати, він чистий, стерильний і допускає можливість повторного використання. Цей субстрат дозволяє підняти врожайність (до 30 разів) томатів, огірків, картоплі, цибулі, салату, бобів, гороху та квітів. Висока ефективність обумовлюється тим, що вермикуліт є активним біогенним стимулятором [8]. Вермикуліт, що відслужив у гідропонних теплицях років 10-15, можна використовувати як розпушувач у відкритому ґрунті.

Економічні розрахунки, проведені на ряді гідропонних комбінатів показали, що незважаючи на більш високу вартість будівництва гідропонних теплиць, вони окупаються набагато швидше, ніж ґрунтові [5].

Звичайно, використання мінеральної вати, як субстрату розвивалося і випробовувалося на початку 1970-х років у Данії, але до кінця попереднього десятиліття воно перемістилося до Голландії, а звідти до Великобританії та інших країн. Мінеральну вату стали розглядати як сполучну ланку в NFT - матеріалу для коренів, якою міг би вільно зволожуватися і дренуватися, а також яким можна було б керувати для забезпечення оптимального співвідношення між повітрям і водою в кореневій зоні. Завдяки зусиллям та досвіду фірми Гродання АС – датської компанії, яка першою стала вдосконалювати мінеральну вату як рослинницький субстрат, мінераловатні плити незабаром були випробувані та утворилися по всій Європі для різних сільськогосподарських культур. Порівняно недавно широке використання мінеральної вати поширилося ще більше в основних рослинницьких центрах Північної Америки, Австралії, Південної Азії та Близького Сходу. За цей час мінеральна вата залишалася в усіх відношеннях постійним продуктом. У міру успішного накопичення досвіду з дедалі більшим спектром культур і умов вирощування, виробничі технології пристосовували якнайточніше до характеристик мінераловатних плит, йдучи назустріч вимогам виробництва [9, 10].

Спочатку з'явилися так звані плити з вертикальним волокном, в яких орієнтація структури волокон була змінена для поширення деякої кількості води, що подається на поверхню плити, і зміни її водоутримуючих характеристик. Потім з'явилися плити з низькою щільністю, економічніші і з трохи меншим співвідношенням повітря та води, але з більш коротким експлуатаційним періодом. Ще зовсім недавно з'явилися плити з різною щільністю, що дозволяють спрямувати розповсюдження води, її стік та аерацію по глибині плити для задоволення вимог певних культур [11, 12].

Мінеральну вату, яку іноді називають кам'яною ватою, виробляють із

базальтових гірських порід або подібних до них діабазів. Подрібнену гірську породу змішують з коксом і суміш доводять до точки плавлення при температурі 1500°C або близько того [12].

Потім із розплавленого матеріалу роблять волокна, намотуючи їх на ряд дисків, що обертаються з великою швидкістю. Довжина та товщина волокон – важливі фактори, що визначають фізичні характеристики кінцевого продукту – контролюються головним чином температурою плавлення та швидкістю обертання дисків. До того, як розплавлена гірська порода потрапляє на диски, її комбінують з добавками, що включають вапняк, зволожуючий агент, і органічний полімер, що з'єднує волокна разом для виробництва плит.

Полімери зазвичай виробляють на основі фенолу – матеріалу схожого на пластичний бакеліт. Інші матеріали додають для забезпечення поглинання води, хоча водовідштовхувальна форма (найчастіше використовується як ізолюючий матеріал у будматеріалах) також використовується в гранульованій формі, як складова частина компостних сумішей або як матеріал, що додається в ґрунт.

Сполучний агент є основним для стабільності структури мінераловатних плит та блоків. Сила та поширеність зв'язків між волокнами визначають тривалість збереження цілісності структури, можливість стерилізації парою і те, скільки разів її можна повторно використовувати без істотних порушень структури.

Усі мінераловатні плити стандартної щільності, придатні для використання, показали, що вони зберігають відповідну структуру протягом семи років або більше для однієї культури тривалого вирощування, як троянди, або витримують повторне використання щонайменше для трьох однорічних культур зі стерилізацією парою перед кожною новою культурою.

Плити зі зниженою щільністю мають коротший експлуатаційний період, але навіть їх можна стерилізувати і постійно використовувати щонайменше ще раз, якщо вони добре зроблені. Коли волокна намотані і починають остигати, їх формують або у вільний пучок, або гранули, або пресують і формують в

контрольованих умовах для утворення плит.

Потім плити можна розрізати на більш дрібні блоки, кубики чи касети. Ця формована продукція обгортається або заочується відповідно до вимог, і потім у ній можна проробляти отвори для вирощування. Розподіл та орієнтація волокон у кінцевому продукті визначаються у процесі виробництва. Якийсь час орієнтація волокон була переважно безладною, але з тенденцією до горизонтального розташування.

Кілька років тому було показано, що найкращого стоку та підвищеної аерації можна було досягти в плитах з переважанням вертикального розташування волокон, тому скріплена мінераловатна продукція тепер ґрунтується на вертикальному розташуванні волокон [13].

Мінеральна вата має багато переваг: має високу пористість для повітря і води; підтримує хороше співвідношення вмісту повітря та води; хімічно інертна; структурно стабільна та має сталість якості; не містить патогенів; її можна стерилізувати парою та використати повторно.

Обмежений обсяг мінераловатної плити означає, що вона має низьку буферну здатність для води та поживних речовин, тому гідравлічні властивості мінеральної вати є важливим фактором при оцінці того, який він і є - той особливий тип плит, який слід використовувати як рослинницький субстрат.

Ізраїльські виробники очікують можливості більш широко використовувати мінеральну вату як субстрат протягом наступного десятиліття.

Дослідження в Єврейському університеті в Єрусалимі мали на меті визначити та виміряти найважливіші гідравлічні властивості різних типів плит з мінеральної вати. Утримання води змінюється під час циклів зволоження та висушення, і розглядається як необхідність у такому роді роботи, і тепер зміни часто виявляються при просуванні матеріалів виробниками [14].

В даний час, схоже, що фізичні властивості мінераловатних плит від основних європейських виробників, хоч і виявляють деякі крайові ефекти, досить схожі для того, щоб будь-які з них були придатними для більшості передбачених ситуацій, у яких ними відповідно керують.

Якщо культуру на мінеральній ваті зволожувати таким чином, щоб вона ніколи не містила менше 15% води або близько чверті того, що міститься відразу після рясного зрошення, тоді культура ніколи не страждатиме від нестачі води, якщо вона має значну та активну кореневу систему [15, 16].

Якщо плити мають вільний стік біля основи, культура ніколи не страждатиме від підтоплення тому, що протягом декількох хвилин зрошення мінеральна вата знову міститиме близько 30 % повітря [16].

Незважаючи на ці основні переваги мінеральної вати, багато зусиль слід докласти для підвищення якості методик зрошення та способів моніторингу для забезпечення того, щоб баланс повітря та води в субстраті був якомога ближчим до оптимального. Ці методики обговорюються нижче, а також у розділах про окремі культури дається додаткова інформація [6].

Таким чином, при вивченні історії походження гідропоніки, було виявлено, що перше масштабне використання водних культур для виробництва продуктів харчування історія приписує американському фітофізіологу професору Вільяму Ф. Герікке, доценту Каліфорнійського університету [17].

При вивченні субстратів виявлено, що можуть служити синтетичні сполуки, смоли, мінеральна вата, вермикуліт, перліт та ін. Субстрати мають важливі для рослин характеристики: не містять нітратів, мають хорошу водоутримуючу здатність, хорошу аерацію, міцність [18].

1.2. Аналіз методів і систем гідропоніки та існуючих конструкцій гідропонних установок

1.2.1. Методи та системи гідропоніки

Нині агропромислове сільське господарство, є однією з пріоритетних галузей економіки України, розвиток якої сприятиме підвищенню матеріального добробуту населення, укріпленню економічної і продовольчої безпеки країни та збільшенню експорту товарів у післявоєнний стан [19].

На всіх етапах розвитку сільського господарства, головним напрямком

діяльності є виробництво продукції рослинництва. У відповідності до цього, основним загальнодержавним завданням є обґрунтування заходів щодо підвищення ефективності виробництва продукції рослинництва та подальшої її стійкості [20].

Виходячи з цього, постає необхідність в аналізі та оцінці існуючих конструкцій, методів і систем гідропонного способу вирощування рослин. При цьому способі, корені рослин отримують мінеральні речовини і знаходяться не в ґрунті, а у волого-повітряному, аерованому водному, чи твердому, але пористому, волого чи повітряноємнісному середовищі. Таке середовище забезпечує дихання коренів і потребує частого поливу розчином мінеральних солей, приготовленим для конкретного виду вирощуваних рослин [21].

До переваг гідропонного способу вирощування рослин у порівнянні з ґрунтовим можна віднести [1–3, 22–25]: раціональне використання земельних ділянок; кращі умови кореневого живлення і водневоповітряного режиму; значні можливості механізації і автоматизації виробничих процесів; особливу ефективність в містах без родючої землі; високу швидкість росту вирощуваних рослин і підвищення їх врожайності; відсутність багатьох проблем з ґрунтовими шкідниками та хворобами, позбавлення використання отрутохімікатів; відсутність шкідливих для здоров'я людини речовин, що неминуче присутні у ґрунті; зменшення витрат води; контроль і управління живильним розчином рослин; нормальний ріст і розвиток рослин.

Окрім значних переваг гідропонний спосіб має і декілька недоліків, до яких відносять: великі грошові вкладення для вирощування рослин даним способом; необхідність володіння значною кількістю спеціалізованої інформації для ведення гідропонного господарства; складність вирощування бульбових культур [3, 4, 23, 26].

Класифікацію існуючих сучасних методів і систем гідропонних установок представлено на рис. 1.1.

У відповідності до приведеної класифікації існують п'ять основних методів гідропоніки, одним з яких є агрегатопоніка.

Агрегатопоніка – це метод вирощування овочів, який передбачає висаджування рослин у водонепроникні стелажі, або піддони наповнені субстратом (гравій, гранітний щебінь, керамзит, вермикуліт) з розміром фракцій від 3 до 12 мм. Шар субстрату повинен бути не менше 20 см. Розчин при даному методі, подається способом підтоплення 2–5 разів на день за командами реле часу, без затоплення верхнього шару субстрату.



Рисунок 1.1 – Класифікація методів і систем сучасних гідропонних установок

Температура розчину повинна складати 23–25⁰С. Раз на тиждень проводять хімічний аналіз розчину і в залежності від цього виконують корегування його складу. Живильний розчин використовують 1–1,5 місяці, а потім замінюють новим.

По завершенню вегетаційного періоду розвитку культури з субстрату видаляють всі кореневі залишки та здійснюють його дезінфекцію 5% розчином формаліну протягом трьох діб, а потім проводять 4–5 разове промивання субстрату теплою водою.

До переваг даного методу можна віднести: відсутність необхідності в пристосуваннях для підтримки вирощуваних рослин; не потребує додаткової аерації кореневого шару; використання одного і того ж самого розчинопроводу як для подачі, так і для відведення його в резервуар; не потребує частих подач живильного розчину.

Недоліками даного методу є [5, 6, 27]: потреба в будівництві дорогих піддонів і стелажів; неможливість підведення лазерного випромінювання до кореневої системи рослин за рахунок наявності субстрату.

Наступним методом гідропоніки виступає водна культура. Водна культура – це метод гідропоніки, при якому коренева система рослин занурена до живильного розчину, що знаходиться в безперервному русі.

Перевагами цього методу є [6, 27]: можливість створення оптимальних умов для росту кореневої системи, що формуватиме високий врожай вирощуваної культури; зниження втрат мінеральних добрив, води і енергії; застосування екологічно чистої технології; можливість проведення лазерної обробки коренів рослин, за рахунок наявності місця встановлення опромінювачів. До недоліків даного методу відносяться [6, 28]: швидке погіршення аерації розчину; зараження живильного розчину патогенними мікроорганізмами; необхідність постійного контролю за концентрацією і реакцією живильного розчину та підтримання їх в оптимальних межах.

Наступним методом гідропоніки виступає хемопоніка [29–32].

Хемопоніка є методом близьким до культури рослин вирощуваних на ґрунтосумішах. Субстратом виступають такі органічні матеріали, як: верховий торф зі ступенем розкладання 30, сфагновий мох, деревну кору, тирсу та ін.

Період використання цих матеріалів в якості субстрату складатиме 1–2 роки. Певні органічні матеріали потребуватимуть попередньої підготовки – подрібнення (кора, стружка), а також корегування реакції середовища. Живлення рослин, які вирощуються даним методом, відбувається способом поверхневого поливу живильним розчином.

Переваги даного методу є такими, як і при агрегатопоніці, за винятком додаткового фактору, який полягає у відсутності потреби в спеціальному

обладнанні, і тому даний метод є придатним для використання в спорудах захищеного ґрунту.

Недоліком його є також, як і при агрегатопоніці [6], відсутність можливості підведення лазерного опромінення до кореневої системи рослин шляхом застосування органічного субстрату.

Аeropоніка – це метод при якому коренева система знаходиться у відкритому просторі при постійному обприскуванні живильним розчином через форсунки (рис. 1.2).

Переваги цього методу: коріння повніше забезпечується киснем у порівнянні з водною культурою, є можливість лазерної стимуляції коренів вирощуваних рослин [6, 33].

Недоліком зазначеного методу є потреба в високій надійності застосовуваного обладнання.



Рисунок 1.2 – Aeropонний метод вирощування гідропонних культур

Останнім розглянутим методом гідропоніки є іонітопоніка [22, 34, 35].

Іонітопоніка – це метод, який за змістом близький до агрегатопоніки. Субстрат, який застосовують, складається з суміші двох типів синтетичних іонообмінних смол: катіоніту КУ-2 і аніоніту ЕДЕ-10П. Катіон є нерозчинним у воді світло-жовтого кольору полімер, який має сильну кислу реакцію, гарно сипучий. Розмір його гранул складає 0,3-0,5 мм. Гідроксили він змінює на іони мінеральних солей. Аніоніт ЕДЕ-10П свої іони змінює на сульфати SO_4 , нітрати

NO_3 , фосфорну кислоту H_3PO_4 та ін. Це жовтий сипучий полімер, розмір його гранул 0,3-1,5 мм. Ці іоніти є міцними, хімічно стійкими, не розкладаються при впливі сонячної радіації, кисню та нормальній температурі повітря.

До переваг такого методу можна віднести: всі позитивні переваги, якими володіє агрегатопоніка, але головною особливістю цього методу є наявність поживних речовин в складі субстрату, що вимагає лише поливу рослин чистою водою [36].

Недоліком його є відсутність умов для встановлення системи лазерної обробки коренів рослин.

Далі проведемо аналіз класифікації гідропонних установок за існуючими видами гідропонних систем.

Система глибоководних культур, або система глибинного потоку DFT – це система, в якій коріння рослин завжди занурене у воду (рис. 1.3), при цьому застосовують великі канали або діжки, які наповнені живильним розчином.

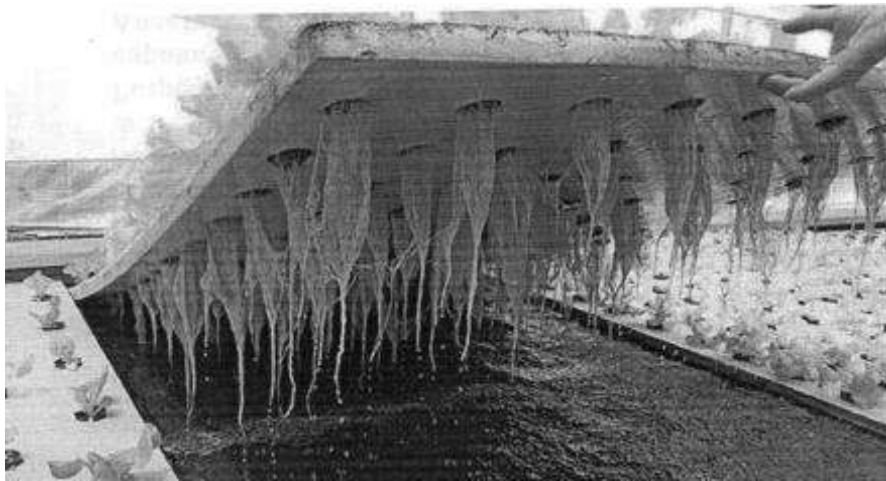


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд системи глибинного потоку DFT вирощування гідропонних культур

Аналіз останніх досліджень дає іншу класифікацію основних систем гідропонної технології: статична культура розчину, культура розчину безперервного потоку (NFT), культура глибокої води, пасивне зрошення, зрошення підводних й дренажних систем, система стікання в каналізацію, глибока вода з підживленням культури, ротаційна система, аеропоніка, гнотова система [37 – 39].

Система культури статичного розчину (рис. 1.4) найпростіша у реалізації: рослини ростуть у розчині води та поживних речовин, які можуть бути обережно аеровані або не аеровані взагалі, і рівень розчину змінюється з певною періодичністю [40]. Оптимальний рівень розчину підтримується за допомогою контролюючих електронних датчиків.

Метод є досить універсальним, але його недоліками є: неефективне використання площ приміщення, води та поживних речовин, трудомісткість пересадки протягом періоду росту, недостатня забезпеченість коріння киснем.



Рисунок 1.4 – Варіант системи статичного розчину культури

Система культури безперервного потоку розчину (техніка поживної плівки – NFT) є найбільш розповсюдженою, оскільки такий спосіб відносно простий, універсальний та економічно ефективний у реалізації (рис. 1.5) [41–43]. Завдяки постійній циркуляції води в NFT-установці вона більш насичена киснем, ніж при використанні попереднього методу. Але таке збагачення є менш ефективним, ніж при роботі компресора.

Цей метод також вимагає великих площ для установки, значних витрат часу на пересадку рослин. Існує також деяке застереження щодо перебоїв у потоці (перебої з подачею електроенергії) та забруднення води в деяких каналах.

Крім того, при використанні NFT-технології існують обмеження на максимальну довжину каналів установок (12–15 м).

Наступний гідропонний метод глибоководних культур також досить поширений (рис. 1.6), але переважно для вирощування салату через відсутність

можливості опори для високих стебел рослин [27, 29, 44].

При реалізації методу компресор забезпечує ефективне насичення води та поживних речовин повітрям. Це сприяє прискореному зростанню рослин. Покращено умови для пересадки, збору врожаю та посадки нової порції рослин (ці стадії можна здійснювати безперебійно).

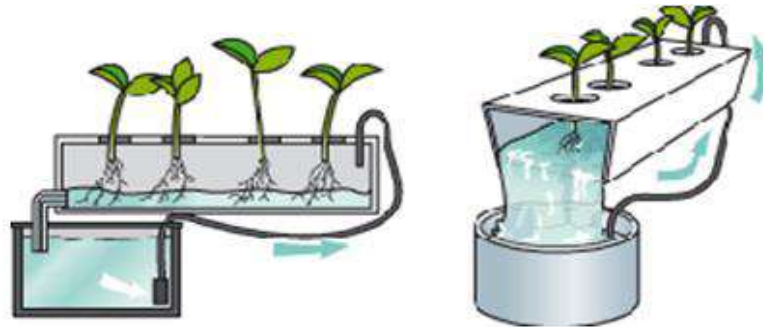


Рисунок 1.5 – Схема реалізації техніки методом поживної плівки (NFT)



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд методу глибоководної культури виробництва салату

Основні недоліки методу: недостатня універсальність щодо вирощуваних культур та неефективне використання площі приміщень.

Система глибоководних культур із підживленням має приблизно ті ж переваги та недоліки, що і попередній спосіб, але технологія DWC з підживленням є більш складною та дорогою у реалізації.

Метод пасивного зрошення культур не забезпечує досить інтенсивного насичення води, тому його використовують для вирощування невеликих партій рослин [45, 46].

Метод підтоплення та зливного зрошення (рис. 1.7а) та метод системи «стікання до відходів» (рис. 1.7б) вимагають застосування більш складного обладнання і не забезпечують значних переваг в порівнянні з технологією виробництва DWC [46–49]. Через це методи отримали переважно експериментальне використання. На даний момент ці методи не реалізовані у великих промислових установках.

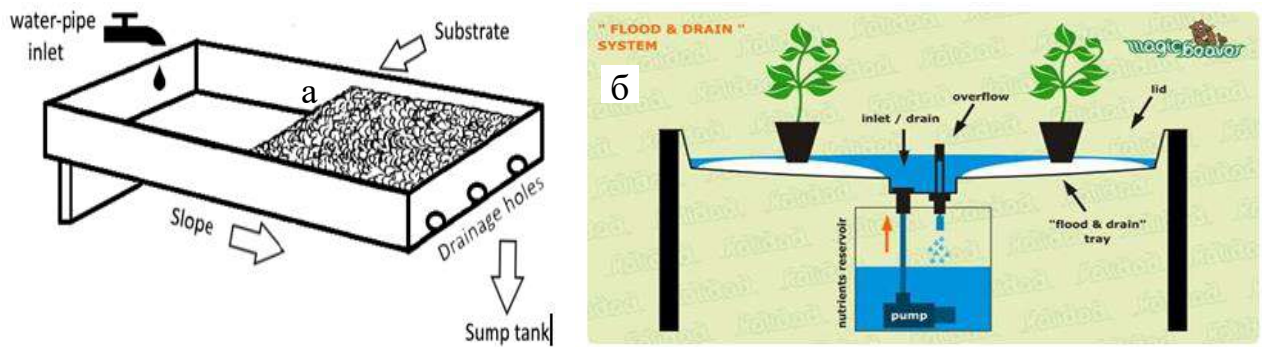


Рисунок 1.7 – Схеми методів: а – системи «стікаючих» відходів; б – системи зрошення підводних та стічних вод

Метод поворотної системи застосовується на експериментальному рівні переважно для демонстрації ефекту динамічних впливів на зростання рослини (періодичне зниження гравітації, збільшення інтенсивності освітлення та живлення водою та поживними речовинами), рис. 1.8.

Попри отримання позитивних результатів таких впливів, метод, з нашої точки зору, має невеликі перспективи для масового впровадження в промисловість через складне і дороге обладнання [28, 32, 50].



Рисунок 1.8 – Конструкція поворотної гідропонної системи

Методи аеропоніки (рис. 1.9) найбільш ефективні з точки зору раціонального використання води та насичення її киснем, але його застосування вимагає застосування складного і дорогого обладнання при експлуатації установок. Це робить ці установки досить дорогими та обмежує їх промислове використання [6, 23, 24, 29, 32, 50].

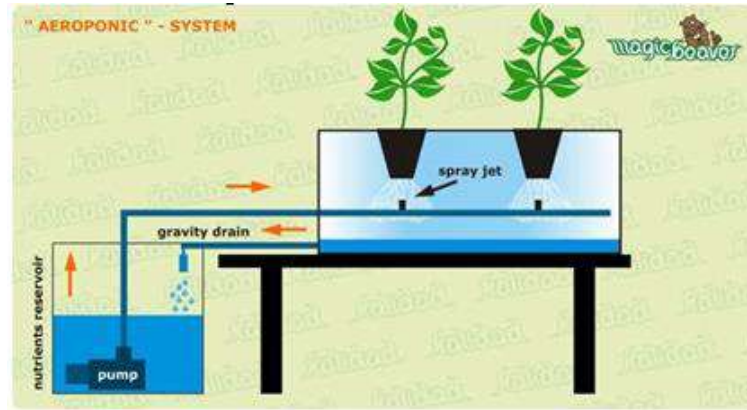


Рисунок 1.9 – Конструкція аеропонної техніки

При субстратному методі гідропонного вирощування рослин (рис. 1.10) застосовують різні види субстратів: вермикуліти та перліти, кору сосни, торфовий мох, кальцитові глини, кокосові волокна, керамзит тощо, які є основою для зв'язування коріння рослин і через які відбувається живлення.

Перевагами субстратного методу гідропоніки (плодоносні виноградники, ягідні культури), є стерильне вирощування культур (уникнення забруднення ґрунтових субстратів патогенними організмами) та задовільний взаємозв'язок утримання необхідних компонентів росту рослин (вологи, повітря, добрив) кореневою системою [50, 51].



Рисунок 1.10 – Загальний вигляд сустратного методу гідропонного вирощування рослин

У подальшому, шляхом поєднання, наприклад, систем гідропонного вирощування DFT і NTF, були застосовані гібридні технології виробництва сільськогосподарських культур, рис. 1.11 [52, 53].

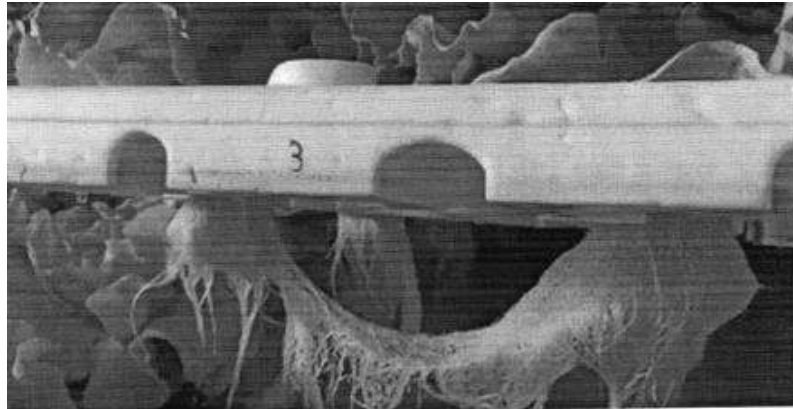


Рисунок 1.11 – Загальний вигляд системи гібридного методу гідропонного вирощування рослин

Основний принцип їх функціонування полягає в тому, що рослини отримують поживні речовини за рахунок подачі зрошувального імпульсу через мікротрубки колектора до застоюної води на глибину 4 см, яка розміщена в столі.

Конструктивну схему системи глибоководних культур DFT представлено на рис. 1.12.

Вона складається з таких елементів: повітряний компресор 1, аератор 2, трубка 3 передачі повітря до розчину, резервуар 4 живильного розчину, кріплення 5 для утримання рослини.

Така система застосовується для вирощування водолюбних рослин таких, як салати та різні болотні культури.

Не застосовується для вирощування овочевих культур.

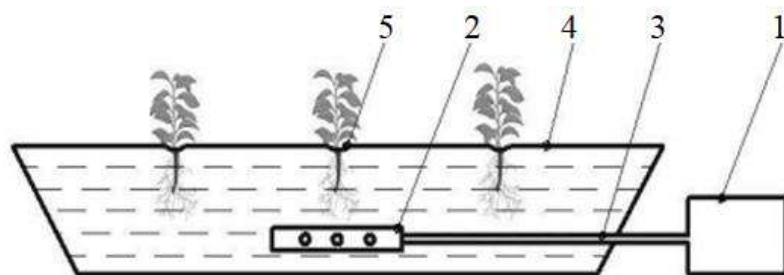


Рисунок 1.12 – Конструктивна схема системи глибоководних культур DFT: 1 – компресор; 2 – аератор; 3 – трубка; 4 – резервуар

Також, негативним фактором цієї системи є необхідність великої кількості живильного розчину в залежності від кількості вирощуваних рослин [21, 24, 54–56]. Ця система дозволяє підвести лазерне випромінювання до кореневої системи і провести їх лазерне стимулювання росту.

Система періодичного затоплення – це система, в якій резервуар з коренями вирощуваних рослин розміщених в певному субстраті, періодично (повністю або частково) заповнюється живильним розчином. Загальний конструктивний вигляд даної системи представлений на рис. 1.13 [57, 58].

Вона складається з таких елементів: резервуар 1 з подвійним дном, насос 2, вихідна трубка 3 насоса, трубка 4 обмеження рівня живильного розчину, ємність 5 зі субстратом для утримання рослини.

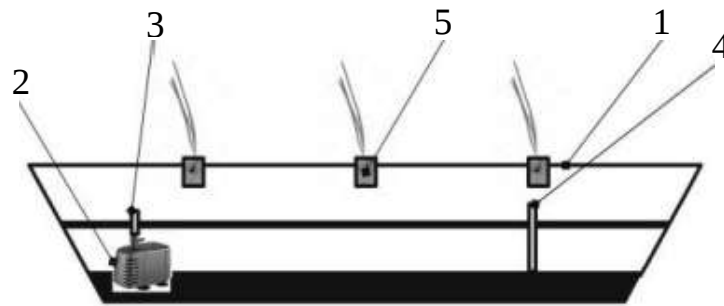


Рисунок 1.13 – Конструктивна схема системи періодичного затоплення

Система може працювати в двох режимах.

У першому, коли коріння вирощуваних рослин знаходиться в повітряному просторі і тільки на дні є незначний рівень розчину, який підтримує постійну вологість.

У другому режимі, в залежності від мікроклімату, застосовуваного субстрату і потреб самої рослини, від 2–8 разів таймер вмикає насос на 10–15 хвилин для повного затоплення живильним розчином верхнього відділення резервуару до встановленої межі обмежувальної трубки [59].

Після проходження встановленого часу таймер вимикає насос до наступного періоду затоплення і розчин через вихідну трубку насоса зливається в нижнє відділення резервуару. Тим самим, оновлюється повітря в кореновому просторі і коренева система збагачується киснем.

Така система знаходить використання для вирощування овочевих культур [21, 60].

Недоліком її є неможливість підведення лазерного випромінювання для стимулювання росту вирощуваної культури у зв'язку з наявністю субстрату.

Наступною у відповідності до класифікації виступає техніка живлячого шару NFT. Це система, у якій живлячий розчин потоком постійно та безперервно рухається через корені вирощуваних рослин, рис. 1.14 [61].



Рисунок 1.14 – Загальний вигляд системи живильної плівки NFT вирощування гідропонних культур

Загальний конструкційний вигляд системи представлений на рис. 1.15 і складається з наступних елементів: резервуар 1, зовнішній насос 2, трубки 3 для підведення і відведення живильного розчину, кріплення 4 для утримання рослини.

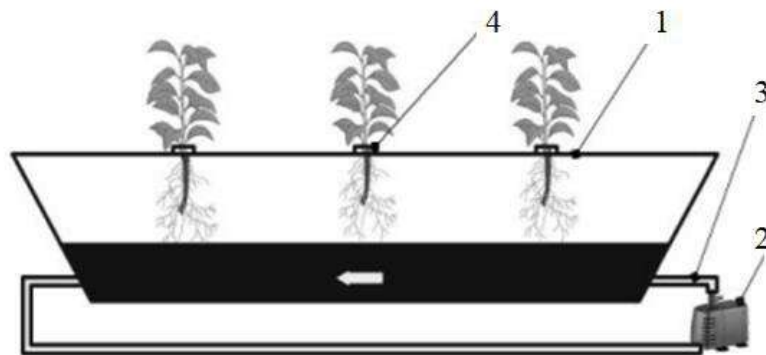


Рисунок 1.15 – Конструктивна схема системи техніки живлячого шару NFT: 1 – резервуар; 2 – насос; 3 – трубка; 4 – кріплення

Безпосередньою особливістю конструкції резервуару для даної системи є те, що форма резервуара достатньо плоска та широка.

Загальний вигляд подачі живильного розчину наведено на рис. 1.16.

При цьому сам розчин створює «струмок» на дні ємкості глибиною не більше 1–2 см. Це забезпечує достатньо широку поверхню, що межує з повітрям. Так при достатній швидкості руху живильного розчину забезпечується перемішування верхнього шару розчину з повітрям, підвищуючи вологість в кореновому просторі і насичуючи сам розчин киснем без додаткової аерації повітряним компресором [21, 62]. Ця система призначена для вирощування швидкостілих культур – салати і зелень.

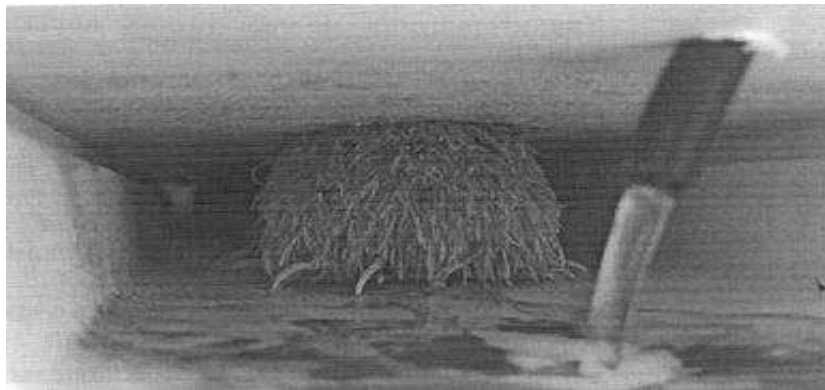


Рисунок 1.16 – Загальний вигляд методу подачі живильного розчину до рослин

Перевагами даної системи є можливість проведення лазерного опромінення коренів рослин, внаслідок відсутності субстрату [63].

Система крапельного поливу – це система, в якій подача розчину відбувається постійно, або періодично, чітко дозованими порціями. Її конструкційний вигляд представлений на рис 1.17.

Вона складається з таких елементів: резервуару 1, насос 2, ємність 3 зі субстратом для утримання рослини, трубка 4 подачі живлячого розчину.

Для подачі живильного розчину в цій системі використовуються регульовані крапельниці, розчин з яких подається під основу стебла рослини на поверхню субстрату [3, 64]. Система не дає можливість реалізувати лазерну обробку коренів рослин, шляхом наявності субстратного середовища для вирощування рослин.

Гнотова система – це система, яка заснована на використанні капілярних сил, де живлячий розчин подається до коренів рослин по гноту. Загальний вигляд конструкції цієї системи представлений на рис. 1.18.

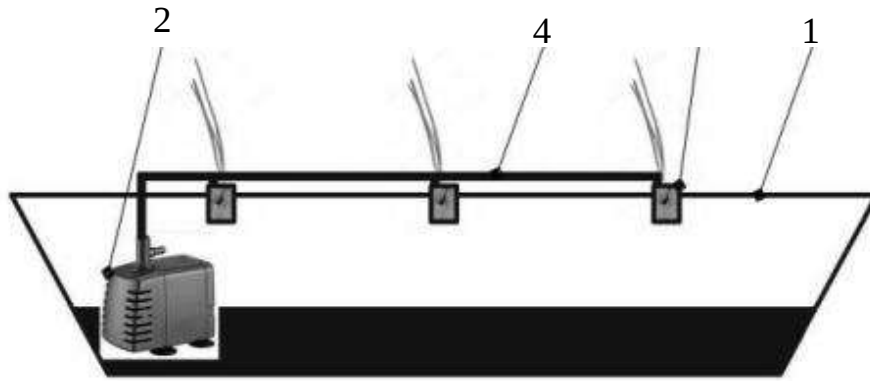


Рисунок 1.17 – Конструкція системи крапельного поливу

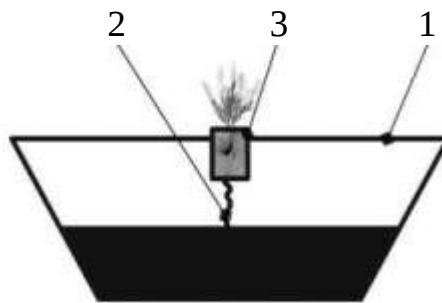


Рисунок 1.18 – Конструктивна схема гнотової системи

Вона складається з таких елементів: ємності 1 живильного розчину, гноту 2, субстрату 3 з утримувачем рослини.

Дана система гідропоніки є досить простою в експлуатації, але має ряд недоліків: пропускна здатність гноту є значно обмеженою, застосовується для вирощування декоративних рослин [24, 65, 66], неможливість встановлення лазерних опромінювачів кореневої системи.

1.2.2. Аналіз відомих конструкцій гідропонних установок

Виробництво гідропонної продукції було започатковано в США (середина 30-х років 20 ст.), де пророщували насіння зернових культур і отримували гідропонний зелений корм. Гідропонні установки – багаторусні стелажі, які розміщувалися в закритих шафах і мали системи підігріву повітря, освітлення та подачі живильних розчинів [67]. У подальшому гідропонні способи виробництва продукції почали впроваджуватися в інших країнах. Проте перші зразки установок мали просту конструкцію, незначну продуктивність, великі експлуатаційні витрати тощо [68, 69].

Промислове впровадження виробництва гідропонної продукції почалося

у 80-х роках минулого століття, що передбачало розвиток і удосконалення конструкцій гідропонних установок.

У Великобританії було розроблено гідропонну установку (рис. 1.19), яка знайшла широке розповсюдження в інших зарубіжних країнах [70].

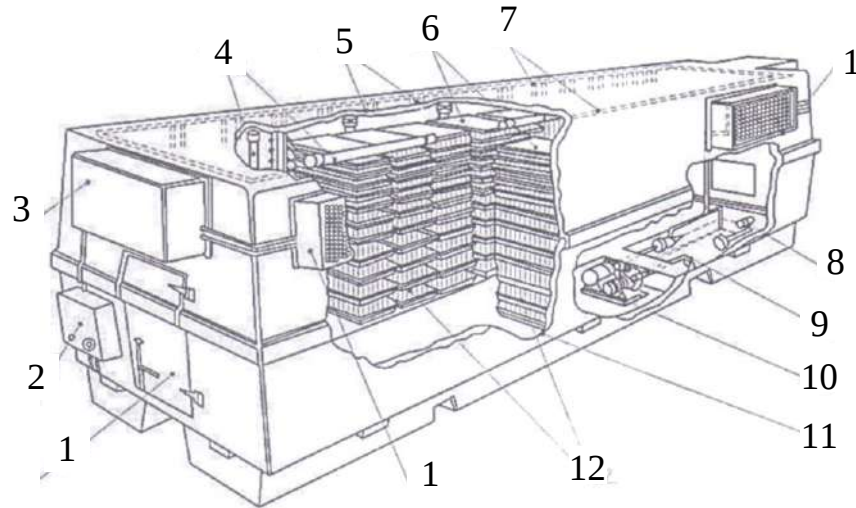


Рисунок 1.19 – Конструктивна схема гідропонної установки Landsaver HD-1000: 1 – входні двері; 2 – блок управління; 3 – кондиціонер; 4 – лампи освітлення; 5 – форсунки; 6 – блок пророщування зерна; 7 – система орошення; 8 – реле контролю; 9 – фільтр; 10 – насос; 11 – теплоізоляція; 12 – блок пророщеної продукції

Установка виконана у вигляді автономної термоізольованої камери, яка розміщується на відкритому повітрі. Автономна система керування забезпечує постійну температуру $20 - 22^{\circ}\text{C}$, дозований полив рослин (норма поливу розчину – 6 л/м^2) методом дощування за добових витрат живильного розчину $1,0 \text{ м}^3$. Опромінення рослин забезпечують 15 люмінесцентних ламп потужністю від 80 до 130 Вт. Загальна площа вегетаційної поверхні становить 165 м^2 . Установка може транспортуватися на автомобільній платформі.

Гідропонна установка Landsaver HD-150 (рис. 1.20а) фірми Hidrodan (Великобританія) має виробничу продуктивність 150 кг продукції за добу.

Установка має менші габаритні розміри порівняно з установкою рис. 1.19 та являє собою вегетаційні шафи, які мають розсувні двері для скорочення виробничих приміщень. Виробничий процес однотипний процесу роботи гідропонної установки Landsaver HD-1000 [72].

Чотири яруси гідропонної установки (рис. 1.20б) [73] виконані у вигляді пластмасових ван, які мають регульований температурний підігрів. Живлення рослин відбувається методом підтоплення. Установка розміщується в спеціальному приміщенні, де є штучне освітлення, система вентиляції, водопостачання та система автономного живлення рослин. Всі операції виконуються вручну.

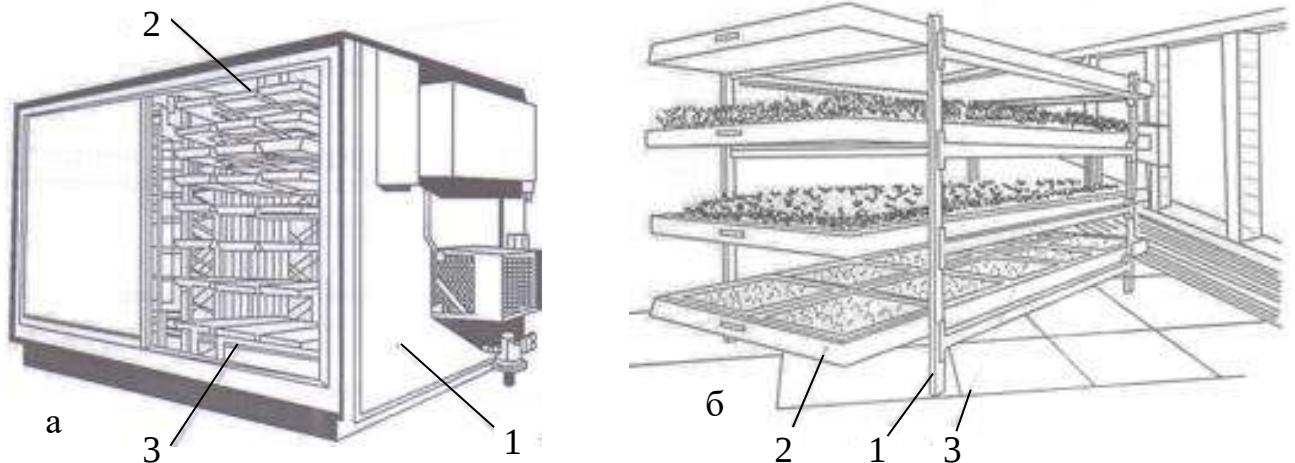


Рисунок 1.20 – Конструктивна схема гідропонної установки: а – Landsaver HD 150: 1 – кліматична камера; 2 – блок пророщування зерна; 3 – блок готової продукції; б – чотириярусної установки Herbagrass фірми Agrotechnik: 1 – каркас стелажа; 2 – блок пророщування зерна; 3 – блок готової продукції

Американська фірма у середині 80-х років випустила гідропонну установку конвеєрного типу (рис. 1.21а) [74], де лотки з ємностями закріплені до замкнутого ланцюгового транспортера, який розташовується у вертикальній площині. Рух транспортера відбувається за допомогою електромотора з зубчастим приводом.

Гідропонна установка ярусного транспортерного типу (рис. 1.21б) [75], де ланцюговий транспортер 1 кожного ярусу є окремою ділянкою вегетаційної поверхні, яка конструктивно не пов'язана з іншими ярусами. Яруси розміщені на загальній несучій конструкції.

Особливістю є те, що у даній установці відсутній свій окремий блок для попереднього пророщування посівного матеріалу, а ця операція відбувається на вегетаційній поверхні та є частиною єдиного періоду виробництва гідропонної продукції.

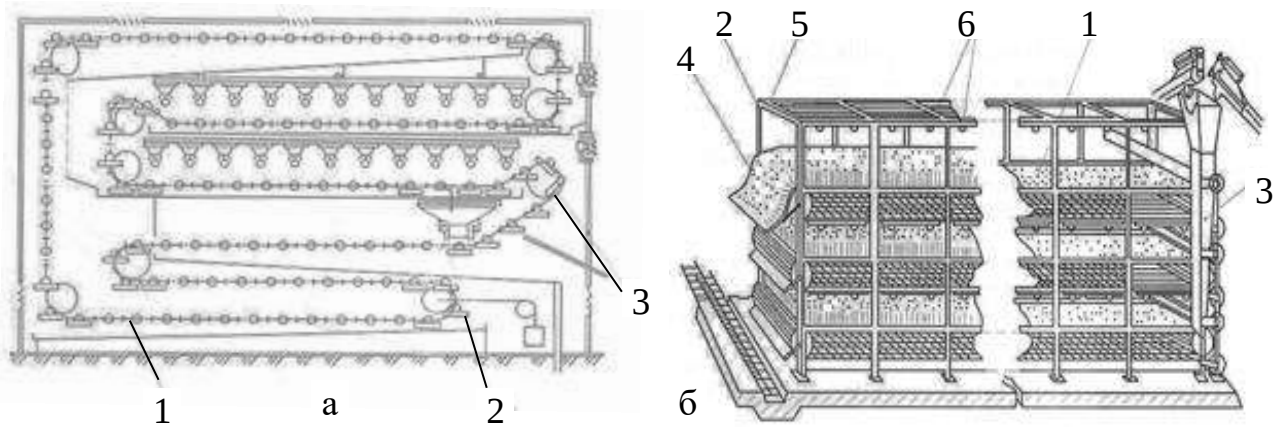


Рисунок 1.21 – Схеми гідропонних установок: а – конвеєрна гідропонна установка: 1 – замкнутий транспортер; 2 – блок закладання; 3 – блок збирання готової продукції; б – транспортерна гідропонна установка: 1 – блок вегетаційної поверхні; 2 – несуча конструкція; 3 – блок закладання; 4 – блок збирання; 5 – блок освітлення; 6 – блок зрошення

Багаторярусна гідропонна установка (рис. 1.22) [76], має жорсткий каркас 1, до якого закріплено труби 3 з лотками 4. Поворот ярусів відбувається за допомогою приводу вала редуктора 9. У бортів лотка по його ширині встановлені штуцери 12 і 13, які призначені для підведення поливної комунікації живлення рослин й дренажу відповідно. Додаткове опромінення рослин забезпечується лампами денного освітлення.

Продуктивність установки – 330 кг продукції на добу.

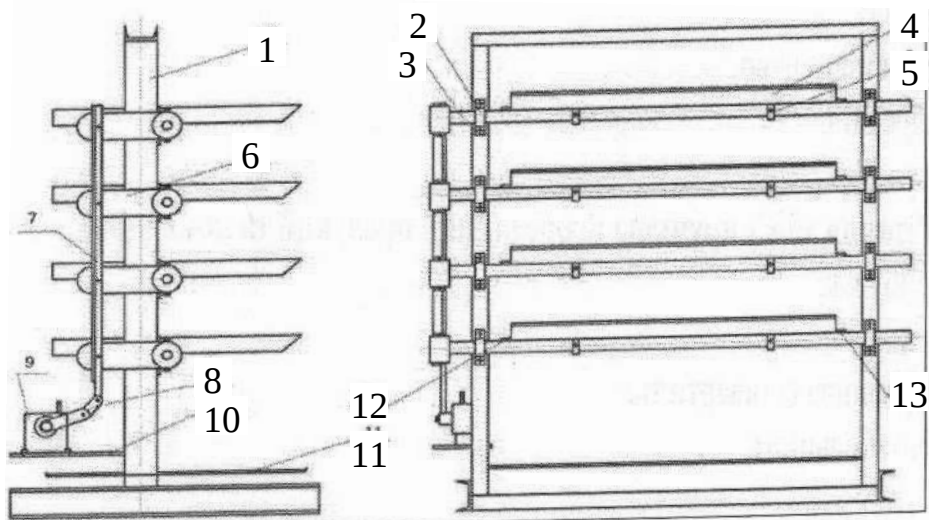


Рисунок 1.22 – Схема поворотної гідропонної установки: 1 – каркас рами; 2 – підшипник; 3 – труба; 4 – лоток; 5 – хомут; 6 – ричаг; 7 – загальна тяга; 8 – проміжна тяга; 9 – редуктор; 10 – платформа; 11 – піддон; 12, 13 – штуцер

Проте, основним недоліком проаналізованих гідропонних установок є відсутність засобів механізованого виконання висівних і збиральних робіт, які замінюються ручними операціями обслуговуючого персоналу.

Крім того, наявність значної кількості форсунок і зливів зрошувальної системи призводить до частого засмічення зрошувальних систем і відповідно, до переривання технологічного процесу виробництва продукції, що знижує продуктивність роботи таких систем.

На сучасному рівні для виробництва гідропонної продукції застосовують декілька варіантів великомасштабних механізованих цехів, прикладом яких може бути цех моделі GF-10 австрійської фірми Andritz для виробництва гідропонної продукції (рис. 1.23) [77].

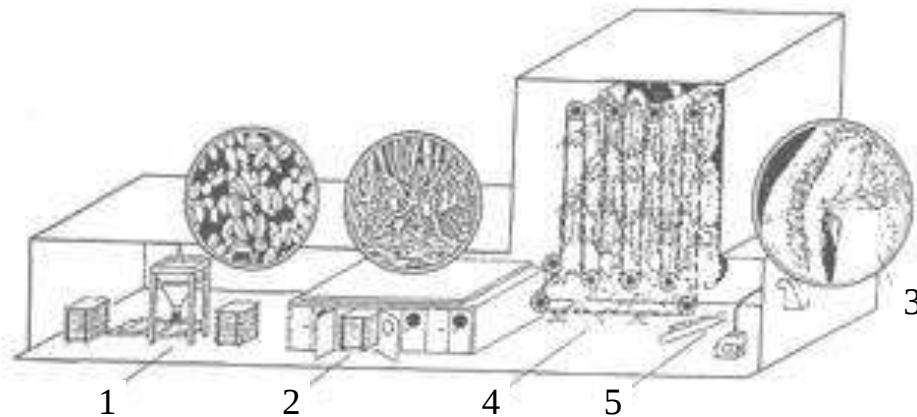


Рисунок 1.23 – Схема механізованого цеху моделі GF-10: 1 – блок підготовки; 2 – блок пророщування; 3 – кореневі пласти рослин; 4 – конвеєрна поверхня; 5 – блок збирання

Цех складається з трьох блоків: підготовчого, пророщування насіння, збирання готової продукції.

Підготовчий блок призначений для завантаження зерна в приймальний бункер та його замочування, попереднього набухання в баку та вивантаження ронганговим транспортером з бака до блоку пророщування насіння.

Блок пророщування насіння призначений для отримання кореневого пласту гідропонної продукції. Цей блок має вісім кліматичних камер тунельного типу висотою 2 м і довжиною 7 м, причому завантаження та розвантаження кожної камери відбувається автономно.

Блок збирання готової продукції призначений для отримання зеленої листової маси на поверхні кореневих пластів і має вертикальну башню вистою 16 м, де розташований вертикально-замкнутий конвеєр, пристрій для збирання готової продукції та пристрій для закладання нових кореневих пластів.

Пристрій для збирання готової продукції являє собою спеціальні механізми, які розміщені на візках, які рухаються по направляючих коліях.

Цех також має системи підтримання мікроклімату, приготування живильного розчину та керування процесами. Штучне освітлення відсутнє – сонячне проміння потрапляє через пояс віконних прорізів.

Продуктивність цеху – 10 т в добу, обслуговуючий персонал становить 5 чоловік.

Цех моделі LMF-3,3 (рис. 1.24) австрійської фірми LMF має два блоки – підготовчий блок і блок вирощування рослин [78, 79].

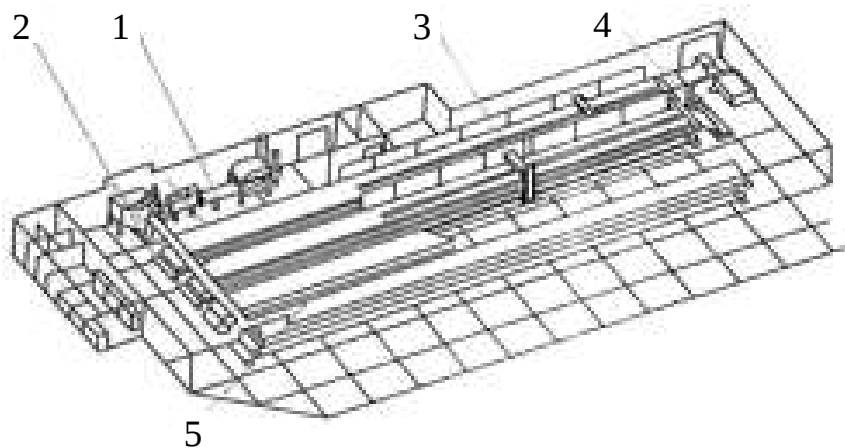


Рисунок 1.24 – Схема цеху LMF-3,3 для виробництва гідропонної продукції: 1 – підготовчий блок; 2 – стрічковий транспортер; 3 – мобільний візок з системами освітлення, зволоження та вентиляції; 4 – подрібнювач; 5 – додаткові виробничі транспортери

Підготовчий блок призначений для приймання зерна, його зберігання та замочування виробничої партії зерна. Основні складові одиниці блоку: башня для зерна масою 5 т, зерноочисні машини, бак ємністю 6 м³ для замочування зерна.

Блок вирощування рослин має набір окремих автономних стрічкових транспортерів з окремим електроприводом, які змонтовані на ярусних стелажах шириною 2 м і довжиною 30 м.

Кожний стелаж має мобільний візок, де встановлено систему освітлення, зволоження та вентиляції кореневої зони посівів рослин. Закладання насіння та збирання готової продукції відбувається з протилежної сторони горизонтальних стрічкових транспортерів. За 6 днів на кожному із 6 транспортерів виробляється приблизно 3,3 т готової гідропонної продукції [80–82].

Основними недоліками таких цехів є нерівномірність кінематичних характеристик ланцюгових транспортерів, складність технологічного обладнання, що призводить до порушення процесу виробництва продукції та її дороговизни.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу існуючих сучасних конструкцій гідропонних установок можна встановити, що для ефективного використання лазерної обробки кореневої системи рослин потрібно обрати метод водної культури і системи глибоководних культур DWC або техніки живлячого шару NFT.

Таким чином, впровадження гідропонних установок є перспективним напрямком сільського господарства, оскільки вони дозволяють отримувати цілий рік свіжі овочі, фрукти та зелень, у тому числі і екзотичні види для деяких регіонів.

1.2.3. Аналіз систем керування гідропонним обладнанням

Для забезпечення високої ефективності функціонування обладнання гідропонних установок (мінімальні витрати енергії, матеріалів і часу, максимальна продуктивність рослин) важливо забезпечити рослини оптимальною кількістю поживних речовин (азот, калій, сірка, кальцій, магній, фосфор, натрій), мікроелементів (залізо, бор, йод, мідь, цинк, кобальт, молібден, марганець), кислот, солей. При цьому концентрація деяких з цих добавок може становити кілька міліграмів [83].

Отже, актуальним завданням є точне дозування компонентів поживних речовин. Існує кілька варіантів обладнання для точного дозування рідких розчинів: клапани з електричним керуванням для подачі палива в реактивні двигуни (вони мають високу ціну через використання в їх конструкції дорогих

матеріалів), гідравлічні двигуни з періодичними поворотами виконавчого елемента для кута менше 360° (не забезпечують точного регулювання кута повороту) та лінійних електрогідравлічних двигунів (мають інше позначення та конструкцію, що вимагає доопрацювання).

Отже, сучасне та ефективне гідропонне обладнання повинно забезпечувати автоматизований контроль і підтримку з високою точністю вмісту добавок залежно від вмісту в листках рослин калію, кальцію, фосфору, натрію, нітратного азоту, магнію та інших важливих елементів.

Тому актуальним завданням є вибір або розробка апаратів для контролю та дозування поживних речовин, мікроелементів, кислот і солей.

Розглянемо основні види відомих пристроїв контролю подачі рідини, які можна використовувати в гідропонних установках. Одним із найпростіших варіантів цих апаратів є дроселі. Їх спрощені схеми представлені на рис. 1.25 [84].

Апарати мають надійну конструкцію, але забезпечують лише ручне керування подачею рідини шляхом зміни розміру отвору. Це не дозволяє реалізувати ефективну оптимальну підтримку дозування поживних речовин для багатьох видів культур.

Крім того, ваги цих апаратів не мають секторів для точного регулювання певного розміру отвору або подачі рідини. Власне, для встановлення оптимального режиму функціонування цих апаратів слід використовувати експериментальний метод проб і помилок [84].

Це спричиняє значні втрати часу при налагодженні дроселів гідропонної установки для подачі кількох різних культур. Крім того, як бачимо на рис. 1.25, деякі дросельні заслінки містять кілька складних за формою деталей і повинні бути виготовлені з високою точністю.

Регулятори потоку використовуються для регулювання та підтримки подачі незалежно від зміни тиску. На відміну від дроселів регулятори потоку забезпечують більш стабільну та точну подачу робочої рідини, але мають більш складну та дорогу конструкцію (рис. 1.26) [85].

Власне, ці пристрої містять крім дросельної заслінки компенсатор тиску. Налаштування регуляторів потоку для забезпечення необхідної оптимальної подачі робочої рідини здійснюється вручну, що призводить до зниження ефективності використання цих апаратів для подачі багатьох видів сільськогосподарських культур.

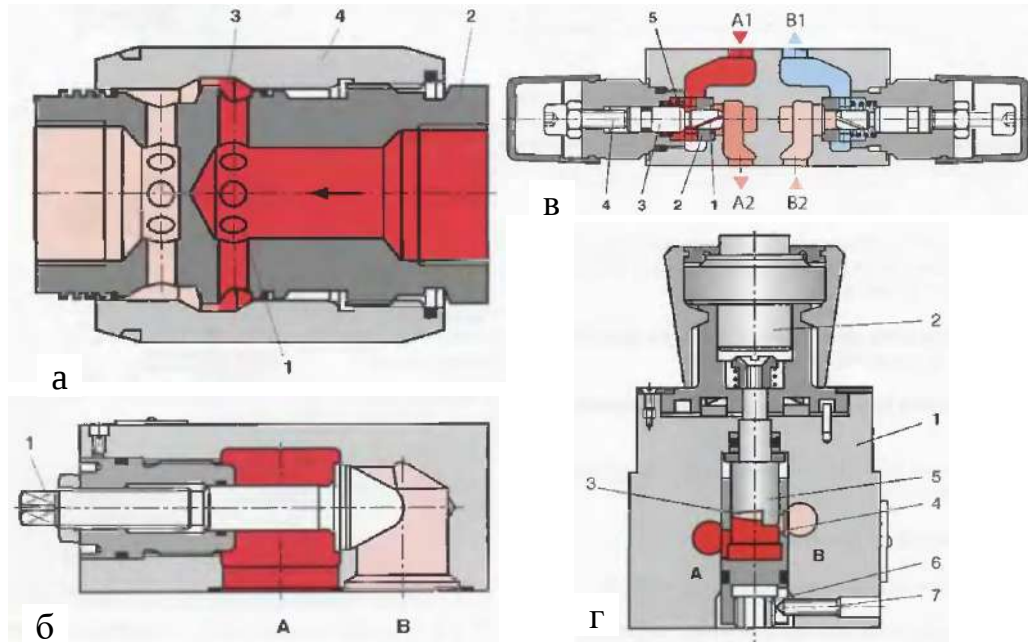


Рисунок 1.25 – Схеми дроселів: а – дросель різьбового кріплення; б – дросель кріплення валика; в – подвійна дросельна заслінка із зворотними клапанами модульного монтажу; г – налаштування дросельної заслінки

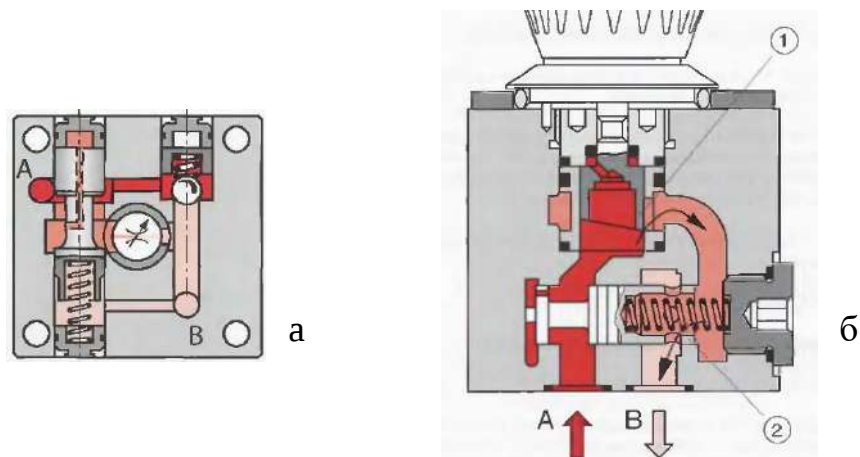


Рисунок 1.26 – Схеми регуляторів потоку: а, б – подвійна лінія з компенсатором тиску на вході та виході відповідно

Крім того, не існує універсальних формул для розрахунку необхідної кількості поділок масштабу регуляторів потоку в залежності від заданого запасу робочої рідини.

Принцип дії регулятора потоку прямої дії (рис. 1.27) заснований на підтримці постійного перепаду тиску на дросельному пристрої з постійним гідравлічним опором. Постійний перепад тиску на клапані з постійним гідравлічним опором гарантує постійний потік через нього [84, 86].

Регулятори витрати води забезпечують підтримання діапазону витрат шляхом зміни гідравлічного опору дросельного елемента в процесі регулювання. Різниця тиску дросельного елемента підтримується постійною. Фактично автоматичний регулятор витрати води поєднує в собі два пристрої – балансувальний клапан і регулятор перепаду тиску, що закривається при збільшенні підтримуваного значення.

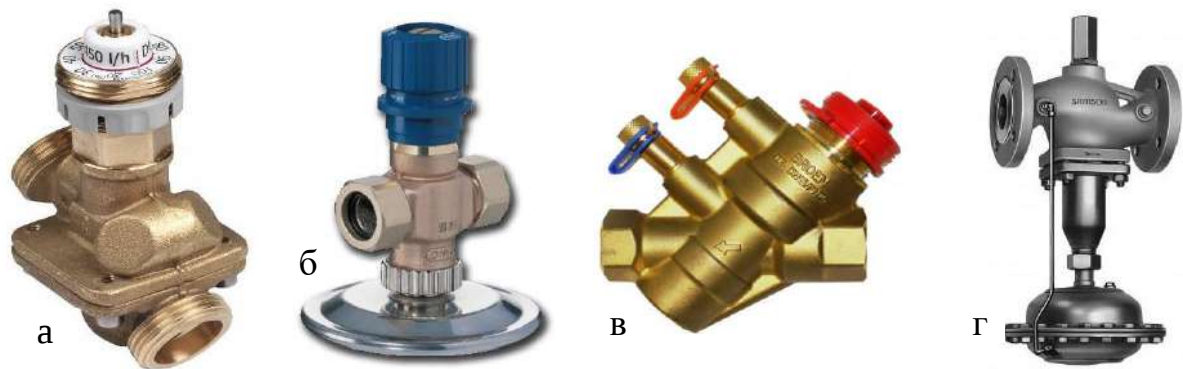


Рисунок 1.27 – Загальний вигляд регуляторів потоку прямої дії: а – АВ-QM (Danfloss); б – Комбі-ФК (Honeywell); в – Ballorex Dynamic (Broen); г – 42-36 (Самсон)

Але ці апарати призначені для роботи з безперервною подачею робочої рідини, оскільки принцип їх дії заснований на регулюванні подачі в залежності від тиску робочої рідини і в разі нестабільної роботи або періодичного включення і відключення насоса гідравлічної системи. Системі потрібен деякий час для налаштування її робочих параметрів. Все це призведе до зниження ефективності функціонування гідропонної установки у випадку використання регулятора потоку прямої дії [87, 88].

Наступним типом апаратів для контролю подачі є розподільники паливних компонентів рідкопаливних двигунів (рис. 1.28). Їх особливості: функціонують протягом короткого часу і з високою продуктивністю, в конструкції використовуються матеріали стійкі до теплових та інтенсивних навантажень, висока ціна.



Рисунок 1.28 – д Загальний вигляд апаратів керування рідкопаливними двигунами: а, б – гідравлічний дросель для регулювання потоку з електроприводом; в – двошвидкісний дросель кулачкового типу для переведення з режиму основного двигуна на режим дроселювання

Отже, ці апарати не зовсім придатні для роботи в структурі гідропонних комплексів. Тому, як бачимо, наявні апарати для контролю подачі робочої рідини не відповідають вимогам щодо їх використання.

Необхідною умовою створення високоефективних автоматизованих гідропонних технологічних комплексів є аналіз і вибір оптимальних варіантів систем автоматичного контролю та регулювання забезпечення водою, поживними речовинами та мікроелементами, зміни параметрів освітлення та вентиляції, тиску, температури та вологості в виробничі площі гідропонних підприємств.

Існує кілька основних класифікацій автоматичних систем контролю та регулювання. За призначенням їх поділяють на [89–92]: стабілізуючий (для підтримки постійного значення заданого параметра); програмування (для підтримки значень деяких параметрів відповідно до заданої програми); спостереження (для регулювання деяких параметрів залежно від деяких заздалегідь невідомих значень на виході з системи).

У гідропонних системах слід використовувати ці три типи систем керування. Системи стабілізації та програмування – у разі вирощування одних і тих же видів культур протягом досить тривалого періоду, з використанням того ж обладнання.

Третій тип системи контролю цієї класифікації необхідний при дослідях з новими видами сільськогосподарських культур для постійного або періодичного аналізу вмісту деяких поживних речовин або мінералів в їх стеблах і листі з метою визначення оптимального режиму їх живлення.

Залежно від кількості контурів керування системою це може бути [84, 93]: одноконтурні системи; багатоконтурні системи.

Багатоконтурні системи або системи зворотного зв'язку ефективніші для використання в гідропонних комплексах, оскільки забезпечують необхідні оптимальні робочі параметри в ході всього процесу вирощування.

Ще одна класифікація систем керування – їх поділ за кількістю контрольованих значень [84, 95]: одновимірні системи – з одним регульованим параметром; багатовимірні системи – з декількома регульованими параметрами, більш необхідними для великих сучасних гідропонних технологічних комплексів.

З урахуванням значної кількості контрольованих параметрів в процесі експлуатації гідропонних комплексів, особливо при вирощуванні кількох видів сільськогосподарських культур на одному підприємстві, другий тип системи цієї класифікації буде набагато ефективнішим за перший.

За технологічним призначенням розрізняють системи та пристрої для контролю тиску, живлення, температури, вологості, вмісту деяких поживних речовин, мінералів чи хімічних елементів, рівня освітленості тощо. Усі ці системи та пристрої є досить важливими для гідропонних комплексів.

З урахуванням характеру функціонування (частоти проведення вимірювань і регулювання) системи керування поділяють на [96–97]: періодичні системи – з періодичним контролем і регулюванням заданих параметрів; безперервні системи – з безперервним контролем і регулюванням заданих параметрів.

Залежно від виду вирощуваної культури, необхідної підживлення водою, поживними речовинами, мікроелементами, режиму температури, вологості, освітленості, вентиляції можуть застосовуватися періодичні та безперервні системи контролю та регулювання.

За принципом дії виконавчі елементи цих апаратів можуть бути механічними, гідромеханічними, пневмомеханічними, електромеханічними та електромагнітними. Існують аналогічні та цифрові програми функціонування систем управління.

Механічні системи існують з керуванням від кулачків, формувачів. Кулачки мають широке поширення в верстатобудуванні, що забезпечують зміну швидкості або напрямку руху виконавчих елементів верстата відповідно до конфігурації елемента керування. Механічні системи мають досить просту і надійну конструкцію, але надають обмежені можливості для реалізації різних режимів і параметрів керування, до того ж процес їх налаштування для виконання інших режимів є досить трудомістким.

Ці системи не відповідають вимогам ефективного використання в сучасних гідропонних технологічних комплексах.

Електромеханічні та електромагнітні системи є більш компактними та гнучкими (надають ширші можливості для реалізації різноманітних режимів і параметрів з меншими витратами часу) порівняно з механічними системами керування. Існує кілька типів електромеханічних та електромагнітних систем; деякі з них представлені на рис. 1.29 [98].

Їх недоліки: досить висока складність і витрата матеріалів.



Рисунок 1.29 – Загальний вигляд виконавчих механізмів електромеханічних систем керування: а – однооборотний електромеханізм МЕО-100; б – лінійний виконавчий механізм Electrapak-PPA-AC115

Електропневматичні керуючі пристрої (рис. 1.29а) [98] мають просту і надійну конструкцію і можуть забезпечити точне і стабільне функціонування систем подачі води, поживних речовин, мінералів, проведення електричної енергії для обігріву, вентиляції та освітлення відповідно до заданого режиму.

Їх недоліками є: нерівномірний режим роботи автомата, через використання стислого енергоносія (повітря), значний рівень шуму під час роботи, необхідність використання компресора для забезпечення функціонування виконавчих елементів.

Розрізняють мембранні та поршневі електропневматичні виконавчі елементи [96]. Як основний вид носіїв інформації в системах управління сучасних машин досить різного призначення, в тому числі гідропонного обладнання, в останні десятиліття використовуються цифрові мікропроцесорні пристрої, рис. 1.30б [98].

У порівнянні з аналогічними елементами управління (кулачками, формувачами, шаблонами) цифрові пристрої надають значно ширші можливості для реалізації різноманітних параметрів і режимів функціонування гідропонного обладнання, а також швидкої зміни цих режимів.



Рисунок 1.30 – Схема мембранного виконавчого механізму з верхнім ручним підстійним елементом (а); б – загальний вигляд мікропроцесорного регулятора МТП-44

Перевагами гідромеханічних виконавчих механізмів системи управління є: проста і надійна конструкція, компактні розміри, рівномірність і висока точність функціонування, низький рівень шуму.

Їх недоліками є: досить великі витрати часу на переналагодження системи, використання громіздкої гідравлічної станції приводу виконавчих елементів (рис. 1.31) [98].

При всій своїй високій ефективності та ресурсощадності, сучасні системи автоматизованого управління гідропонними установками мають стаціонарне розміщення структурних елементів із переважно жорсткими зв'язками між ними, а підвищення їх технологічного рівня відбувається переважно за рахунок використання більш точних сенсорів, модернізації технологічного обладнання, що призначене для коригування параметрів навколишнього середовища та удосконаленням алгоритмів обробки інформації.

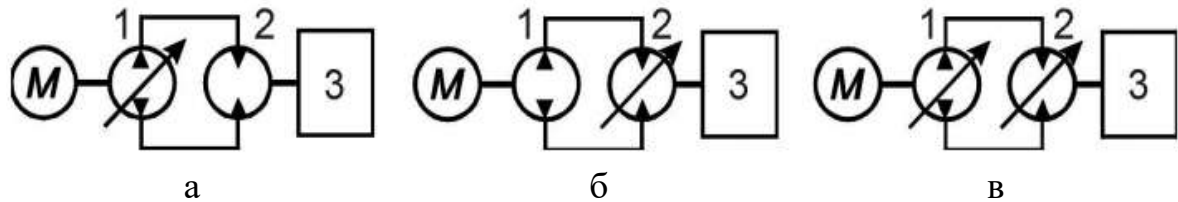


Рисунок 1.31 – Схеми гідроприводів для систем автоматичного керування: а – зі зміною продуктивності гідронасоса; б – зі зміною частоти обертання гідромотора; в – зі зміною продуктивності насоса і швидкості гідромотора; М – асинхронний електродвигун; 1 – гідравлічний насос; 2 – гідромотор; 3 – виконавчий елемент

При цьому питання та постановка завдань підвищення гнучкості та мобільності, шляхом збільшення ступеня всеполюсності, вченими майже не розглядається.

За нашими уявленнями, для подальшого розвитку таких комплексів буде раціональна автоматизація всіх етапів виробничого процесу: формування замовлень від споживачів, їх класифікація за заданими термінами виконання, обсягами та змістом; пошук доступних виробничих потужностей; оцінка їх технологічних можливостей; розподіл замовлень по підприємствах із забезпеченням зарезервованих потужностей для ліквідації наслідків різних аварій та надзвичайних ситуацій; формування замовлень на доставку необхідного посадкового матеріалу, поживних і мінеральних речовин; посів, вирощування і збирання продукції за умови оптимізації основних робочих параметрів і режимів з використанням автоматичного регулювання подачі тепла, повітря, освітлення, води, інших необхідних компонентів.

Реалізація такої комплексної автоматизації можлива на основі відповідного технічного рівня всіх підприємств, як елементів цих технологічних комплексів (виробників рослинництва, аксесуарів і транспорту), їх основного та допоміжного обладнання, систем матеріально-технічного забезпечення та управління, програмного забезпечення.

Необхідні тісні зв'язки та ефективна взаємодія між усіма підприємствами технологічного комплексу з використанням заданої комп'ютерної програми для автоматичного синтезу можливих варіантів функціонування технологічного

комплексу для виконання замовлення чи блоку замовлень, їх аналізу за основними критерії ефективності, обґрунтування та вибір найбільш раціонального варіанту.

Необхідною умовою створення високоефективних автоматизованих гідропонних технологічних комплексів є аналіз і вибір оптимальних варіантів систем автоматичного контролю та регулювання забезпечення водою, поживними речовинами та мікроелементами, зміни параметрів освітлення та вентиляції, тиску, температури та вологості в виробничі площі гідропонних підприємств.

Тому формування передумов для розширення експлуатаційних можливостей автоматизованої системи управління гідропонною установкою шляхом встановлення блоку моніторингу на мобільній агрометеостанції, є інноваційним напрямком, основою якого є дослідження і розробка принципової структурно-функціональної схеми мобільного агрометеорологічного модуля.

З огляду на результати проведеного аналізу можна зробити висновок, що електромеханічні та гідромеханічні виконавчі елементи з цифровими мікропроцесорними керуючими пристроями є найбільш підходящими типами систем регулювання для гідропонного обладнання з огляду на їх експлуатаційні переваги та особливості функціонування керованої установки.

Після аналізу досвіду створення та експлуатації гідропонних установок різних типів, а також порівняння їх переваг та недоліків, були сформульовані вимоги до вдосконалених промислових гідропонних установок: максимальне використання площі приміщення для вирощування рослин; універсальність для вирощування різних видів рослин; інтенсивне насичення води для дощування та укорінення рослин; ефективне використання води та поживних речовин, достатнє забезпечення рослин світлом і киснем; можливість швидкої та зручної пересадки, збору врожаю та підстилки рослин; можливість опори стебел і паростків рослин; простота, технологічність і надійність конструкції установки, можливість її широкого промислового впровадження; простота обслуговування установки, низькі експлуатаційні витрати; стабільна автоматична підтримка основних робочих параметрів установки.

1.3. Аналіз теоретично-експериментальних досліджень процесів роботи гідропонних установок

Перші теоретичні дослідження та практичні експерименти в галузі гідропоніки відносяться до 17 століття, але її більш інтенсивне використання та вдосконалення почалося після 1850 року. Промислове впровадження даної технології на комерційній основі було здійснено в 21 столітті [100–109].

Для опису автоматизованих систем керування процесами живлення рослин в закритому ґрунті використовують різні методи. Зокрема, в низці наукових праць [110–113], в системі вологозабезпечення рослин при крапельному зрошуванні запропоновано використовувати алгоритми оперативної кореляції початкового завдання по вологості залежно від випадкових погодних факторів та даних короткотермінового прогнозу на основі механізмів нечіткої логіки.

Реальні схеми систем дозування компонентів поживних речовин на базі лінійного електрогідравлічного двигуна представлені в роботах [114–116]. Також там наведений математичний апарат для визначення основних робочих параметрів системи та методика його проектного розрахунку. Вплив режиму живлення поживним розчином на розвиток і урожай рослин, а також відповідна концентрація гідропонних колон розглянуто в [117, 118].

Групою авторів в роботах [119–123] проаналізовано вплив температури внутрішнього повітря, вологості, освітлення та спектра сонячної радіації на урожайність рослин при вирощуванні їх в умовах захищеного ґрунту. Наведений аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від мікроклімату споруд який є визначальним для реалізації ефективних інженерних засобів боротьби з перегрівом від сонячної радіації в теплиці і створення оптимального агротехнічного середовища.

Для визначення процесів енергозабезпечення авторами [124–130] запропоновано оперувати трьома критеріями, які забезпечують достатність кількості енергії опромінення D_i (доза) фотосинтетичної активної радіації

(рис. 1.32а).

Також ними запропоновано, що процеси оптимізації енерговитрат необхідно розглядати в двох площинах – в площині інтегральної та диференціальної енергоємності, рис. 1.32б.

При цьому:

- питому потужність природної радіації залежно від часу $P_{num}(t)$, яка забезпечує природний радіаційний режим після проходження через конструктивні отвори в теплиці запропоновано визначати за формулою

$$P_{num}(t) = C_\phi K_z P_{np}(t), \quad (1.1)$$

де C_ϕ – коефіцієнт частки сумарної інтегральної природної радіації;

K_z – коефіцієнт запасу забезпечення розрахункового природного радіаційного режиму;

$P_{np}(t)$ – інтенсивність природної зовнішньої радіації, Вт/м²;

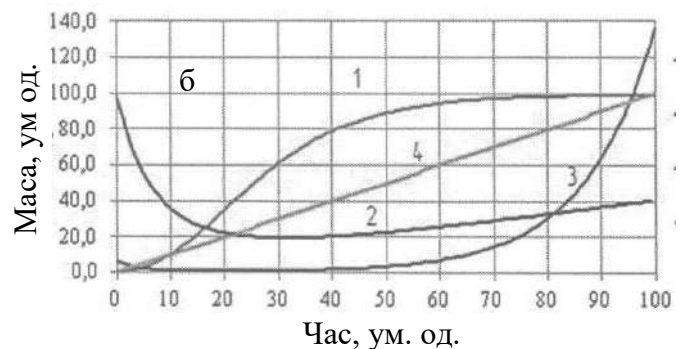
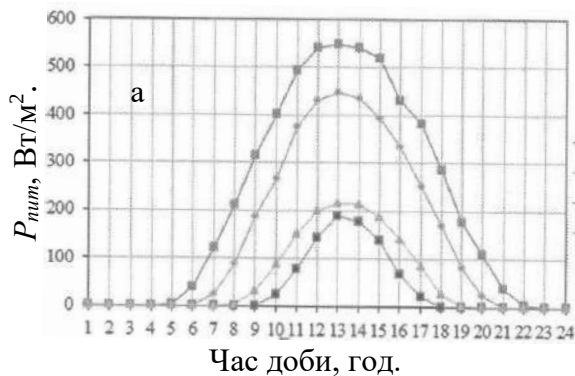


Рисунок 1.32 – Залежність зміни: а – сонячної радіації в теплиці; б – основних показників процесу: 1 – зміни росту рослин; 2, 3 – відповідно, інтегральної та диференціальної енергоємності; 4 – витрат електроенергії

- інтегральну ε_i та диференціальну ε_o енергоємність запропоновано визначати за формулою:

$$\varepsilon_i(t) = P_{um.} t / P(t), \quad (1.2)$$

де $P_{um.}$ – електрична потужність штучного джерела опромінення;

$P(t)$ – показник продуктивності;

t – час;

$$\varepsilon_{\partial}(t) = P_{\text{шт.}} \Delta t / \Delta P(t), \quad (1.3)$$

де $P_{\text{шт.}}$ – електрична потужність штучного джерела опромінення;

$P(t)$ – показник продуктивності; t – час;

- для опису процесів росту рослин застосовують логістичні криві росту згідно з рівнянням Гомпертца:

$$\frac{1}{w} \frac{dw}{dt} = \mu e^{-St}, \quad (1.4)$$

де w – суха маса рослин;

μ – питома швидкість росту;

S – константа росту.

З фізіологічного підходу критерій D_i вважається:

- мінімально-достатнім $D_{\text{дост.}}$ при виконанні умови: для розсади $D_{\text{дост.}} = 400$ Вт год./м²; для культури $D_{\text{дост.}} = 1120$ Вт год./м²;

- мінімально-допустимим $D_{\text{дон.}}$ при виконанні умови: для розсади $D_{\text{дон.}} = 250$ Вт год./м²; для культури $D_{\text{дон.}} = 900$ Вт год./м².

В роботі [131] експериментально досліджено і обґрунтовано особливості формування врожаю салату в умовах плівкової купольної теплиці на природніх та штучних субстратах в проточних гідропонних системах залежно від процесів опромінення рослин (рис. 1.33), при цьому критерій оптимальності описується:

$$D_{\text{доб.}} = \sum_{i=1}^{24} (P_{\text{пр.год.}}(t) + P_{\text{шт.год.}}(t)) \Delta t \geq D_{\text{н.доб.}}, \quad (1.6)$$

$$C_{\text{ел.}} = \sum_{i=1}^{24} P_{\text{шт.год.}}(t) \Delta(t) C(t) = \min, \quad (1.7)$$

$$T_{\text{фП}} = \sum_{i=1}^n \Delta t(i), \quad (1.8)$$

де $P_{\text{пр.год.}}$, $P_{\text{шт.год.}}$ – питома інтенсивність природнього та штучного опромінення на i -му часі фотоперіоду;

$D_{\text{н.доб.}}$ – нормована добова доза опромінення;

Δt – значення часового інтервалу i -го фрагменту фотоперіоду, яке рівне 1 часу.

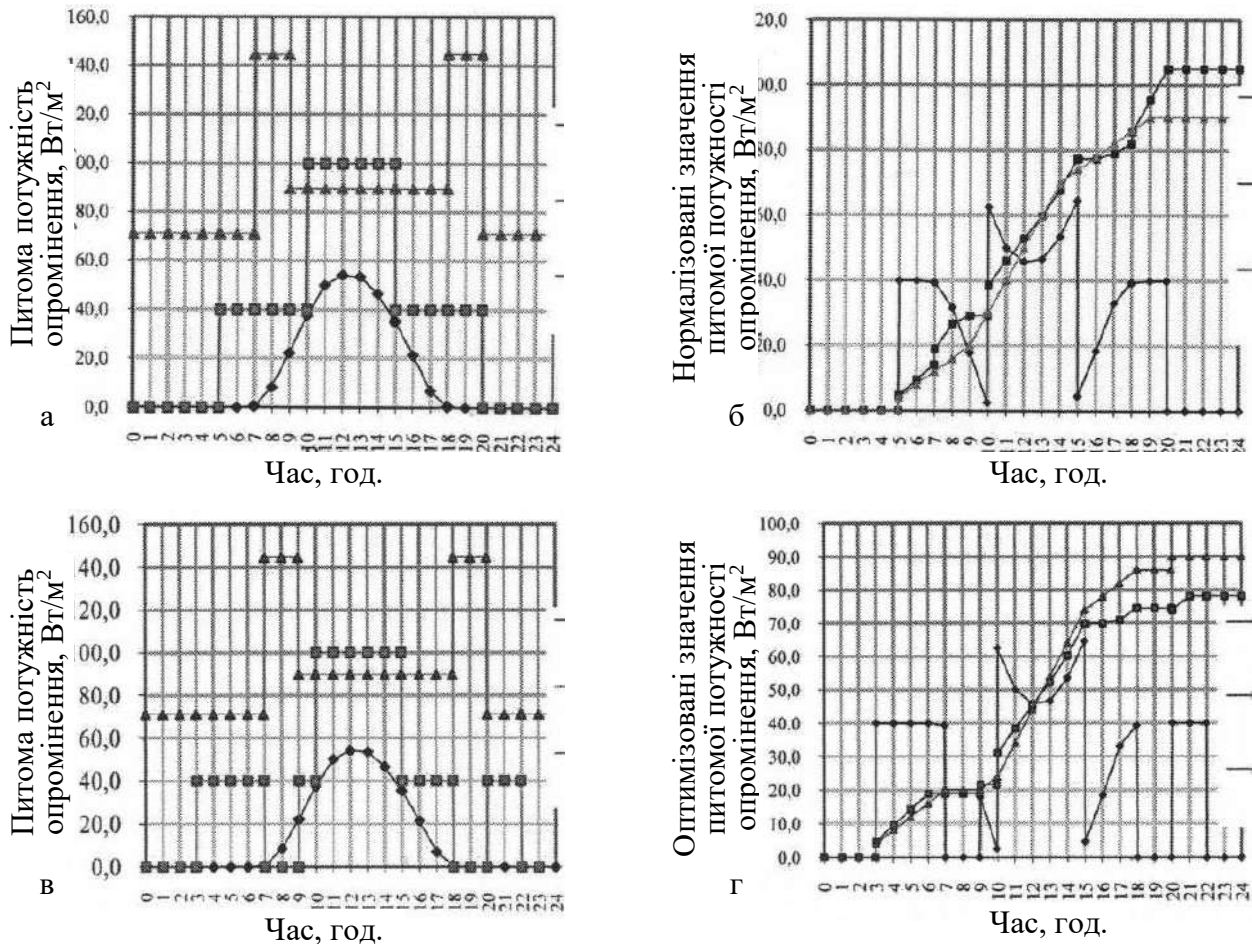


Рисунок 1.33 – Залежності зміни: а – суміщені графіки сонячної інсоляції, фотоперіоду рослин; б – неоптимізовані графіки роботи режиму опромінення; в – результати оптимізації графіка фотоперіоду опромінення рослин; г – оптимізовані розрахункові графіки

Питома інтенсивність фотосинтетичної дози радіації прийнята по мінімально-допустимому фізіологічному критерію, рівному 40 Вт/м^2 протягом 10 год. плюс 10 Вт/м^2 протягом 5 год. При цьому нормована добова доза фотосинтетичної дози радіації становить 900 Вт год./м^2 (рис. 1.33а), а додатковий ефект збільшення добової дози опромінення дорівнює 2,83%, рис. 1.33б. При цьому доза опромінення до оптимізації становить 92,8 ум. од., а після оптимізації – 95,5 ум.од., рис. 1.33в. г.

Аналіз останніх вітчизняних джерел з питань гідропонних систем показує, що недостатньо уваги приділяється саме питанням глибокого вивчення процесів, в тому числі їх математичному опису [132]. В роботі [133] поданий опис основних елементів гідропонної системи, відмічається що важливий вплив

на продуктивність та якість вирощеного урожаю відіграє склад субстрату рекомендований саме для даного виду продукції.

Переваги і недоліки гідропонного способу вирощування овочів проаналізовано в [135] та відмічено, що переваг у гідропонного способу перед традиційним вирощуванням дещо більше ніж недоліків.

Вплив складу субстрату і особливості вирощування салату Ромен гідропонним способом також досліджувались в [111, 136]. Дані роботи ще раз підкреслюють той факт, що для кожних видів сільськогосподарської продукції потрібні свої рецепти субстрату, кожен з них має свої особливості та відмінності від інших. Очевидно, що низький рівень універсалізації технології є однією з причин, що стоїть на заваді широкому розповсюдженню гідропонної системи вирощування культур.

Значно більше уваги приділяється гідропонним системам закордонними вченими та спеціалістами. Так, в роботі [137] розглянуто моделювання процесу живлення рослин при вирощуванні гідропонним способом. На відміну від попередніх робіт тут розглядається більш детально модель живлення, яка, зокрема, враховує і фактори опромінення рослин.

У роботі [138] розглядається динаміка розвитку рослин на температуру кореневої зони, яка змінюється шляхом величини опромінення та температури субстрату. Варто зауважити, що зміна температури кореневої зони за рахунок збільшення температури субстрату є не найкращий спосіб, з точки зору законів термодинаміки. В цій роботі також стверджується, що раціональною температурою для найкращого розвитку кореневої системи рослин є 23-25 °C.

Аналіз останніх досліджень у сфері автоматизації процесів живлення рослин які вирощуються в закритому ґрунті показує, що в даному питанні існують певні «білі плями». В кожному конкретному випадку пропонувалась своя схема автоматизації даного процесу, що призводило до різних результатів реалізації процесу живлення.

1.4. Висновки, мета та завдання досліджень

Аналіз останніх вітчизняних джерел з питань гідропонних систем показує, що недостатньо уваги приділяється саме питанням глибокого вивчення процесів, в тому числі їх математичному опису.

Відмічається, що важливий вплив на продуктивність та якість вирощеного урожаю відіграє склад субстрату, поданий рекомендований склад саме для даного виду продукції і що для кожного овочу потрібні свої рецепти.

Акцентовано, що динаміка розвитку рослин на температуру кореневої зони, яка змінюється шляхом величини опромінення та температури субстрату. Варто зауважити, що зміна температури кореневої зони за рахунок збільшення температури субстрату є не найкращий, з точки зору законів термодинаміки, спосіб, а раціональною температурою для найкращого розвитку кореневої системи рослин є 23-25 °C.

Гідропоніка – перспективний та досить ефективний напрямок сучасного сільського господарства, який інтенсивно розвивається та вдосконалюється в напрямку зменшення необхідних площ, витрат енергії, води, поживних речовин, підвищення заданої продуктивності за рахунок більш інтенсивного забезпечення рослин повітрям та світлом, підвищення універсальності, надійності, ступеня автоматизації та зручності в експлуатації обладнання для реалізації технології.

На даний момент відомо декілька методів гідропоніки, але для комерційного та промислового використання перспективними є методи статичної культури розчину, культури безперервного потоку розчинів (NFT) та культури глибокої води. Всі ці методи вимагають вдосконалення та адаптування до конкретних умов господарювання.

Очевидно, що низький рівень універсалізації технології є однією з причин, що стоїть на заваді широкому розповсюдженню гідропонної системи вирощування культур. Навіть такий, далеко не повний огляд останніх джерел щодо розвитку гідропонних систем свідчить про те, що наразі не вироблена єдина стратегія розвитку галузі, дослідження особливо в нашій країні, носять несистемний та однонаправлений характер.

Все це потребує додаткових досліджень, в першу чергу теоретичних, щодо впливу різних факторів на розвиток гідропонних культур, виявлення закономірностей впливу цих факторів на розвиток рослин.

Метою дослідження є підвищення ефективності вирощування рослин гідропонним методом шляхом розробки конструкції та обґрунтування параметрів багатоярусної установки.

Вирішення даної мети передбачає наукове розв'язання таких **завдань**:

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для гідропонного вирощування аграрної продукції розробити схему багатоярусної гідропонної установки для вирощування салату та мікрозелені.

2. Розробити математичну модель процесу, яка описує та встановлює функціональну зміну мінерального живлення рослин під час вирощування гідропонного салату в теплиці залежно від параметрів коренежиттєвого середовища, записану в аналітичній і операторній формі.

3. Провести математичне моделювання процесу переміщення посівного матеріалу по гладкій поверхні прямокутного лотка під час вирощування мікрозелені гідропонним способом та визначити його раціональні параметри.

4. Провести експериментальні дослідження:

- з визначення характеру зміни показників росту рослин салату за використання гідропонного способу вирощування в теплиці залежно від параметрів освітлення;

- з визначення характеру зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від параметрів процесу його переміщення по поверхні лотка.

5. Запропонувати структурну схему і математичний опис системи автоматизованого функціонування сучасного гідропонного обладнання та методику розрахунку основних параметрів запропонованих гідропонних установок.

6. Визначити економічну ефективність застосування розробленої багатоярусної гідропонної установки у виробничих умовах.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [29, 38, 84, 98].

1. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration of improved hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 66–75. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-7.

2. Севостьянов И.В., Мельник О.С. Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 119–128. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-13.

3. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 61-67. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-7.

4. Sevostianov I., Melnyk O. Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2(105). С. 76–83. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-8.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОЯРУСНОЇ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Будова та принцип роботи багатоярусної гідропонної установки

Вирішення багатьох завдань, що виникли останнім часом в агропромисловому комплексі України, значною мірою залежить від технічної оснащеності сільськогосподарських виробництв, а також запровадження нових передових технологій.

Особливу увагу слід приділити таким галузям як рослинництво, тваринництво та птахівництво, кінцева продукція яких посідає перше місце у живильному раціоні людини [139–142].

Однією з найперспективніших інноваційних технологій є технологія гідропонного вирощування салатів і мікрозелені [143, 144], які містять необхідні поживні речовини та вітаміни, відносяться до екологічно чистої продукції, а виробництво відрізняється простотою та економічністю [145].

Загальним недоліком більшості існуючого обладнання для вирощування салатів та мікрозелені гідропонним методом є низький рівень механізації посівних та збиральних робіт [146].

При цьому в процесі експлуатації виникають деякі складності:

- певні нерівномірності зміни кінематичних характеристик руху, що загалом негативно впливає на динаміку системи;
- при збільшенні площі вегетаційної поверхні значно зростає маса конструктивних елементів, що рухаються, а це призводить до збільшення необхідної потужності приводу;
- складність конструкції та необхідність використання спеціальних пристроїв для поливу вирощуваних рослин, а також досить складна схема керування, яка узгоджує їх роботу з обертанням піддонів із рослинами [49, 147].

Враховуючи зазначені недоліки нами запропонована конструктивна

схема гідропонної установки, що може використовуватись для салату або мікрозелені у теплиці, технічна новизна якої захищена патентом України на корисну модель [148] (додаток А).

Конструктивну схему багатоярусної гідропонної установки наведено на рис. 2.1 [29, 148].

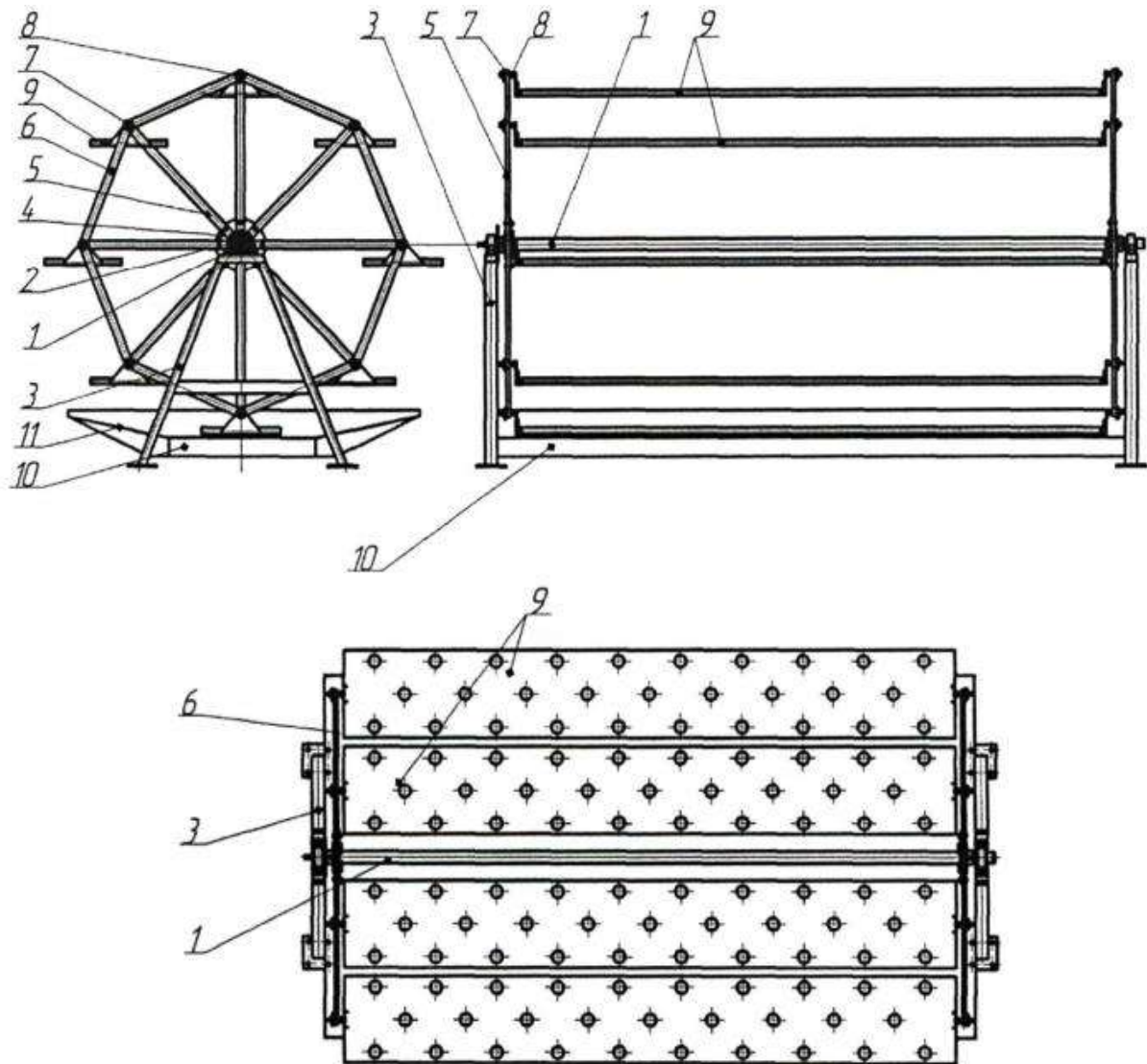


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема багатоярусної гідропонної установки для вирощування салату або мікрозелені у теплиці: 1 – приводний вал; 2, 7 – підшипник; 3 – опора; 4 – фланець; 5 – стержень; 6 – стяжка; 8 – вісь; 9 – лоток; 10 – ємність для живильного розчину; 11 – збірник залишкового живильного розчину

Установка для вирощування гідропонної продукції (салату або мікрозелені) складається з вала 1, що обертається в підшипниках 2, які встановлені на опорах 3. До вала 1 на певній відстані від підшипників 2 встановлені фланці 4 із вісьмома стержнями 5, що рівномірно розташовані під однаковими кутами у вертикальній площині. Кінці стержнів 5 з'єднані між собою стяжками 6, які утворюють основи восьмигранної призми. На кінцях стержнів 5 розміщені підшипники 7, у яких встановлені осі 8. На осях 8 підвішені лотки 9. Унизу пристрою, під лотками 9 до опор 3 прикріплена ємність 10 для гідропонного розчину з збірниками 11 залишкового живильного розчину.

Лотки 9 можуть бути виконані:

- для вирощування салату – у вигляді перфорованої поверхні з отворами для установки в них гідропонних стаканів, рис. 2.2 а;
- для вирощування мікрозелені – у вигляді прямокутної гладкої поверхні, по периферії якої закріплено обмежувальні борти, рис. 2.2 б;

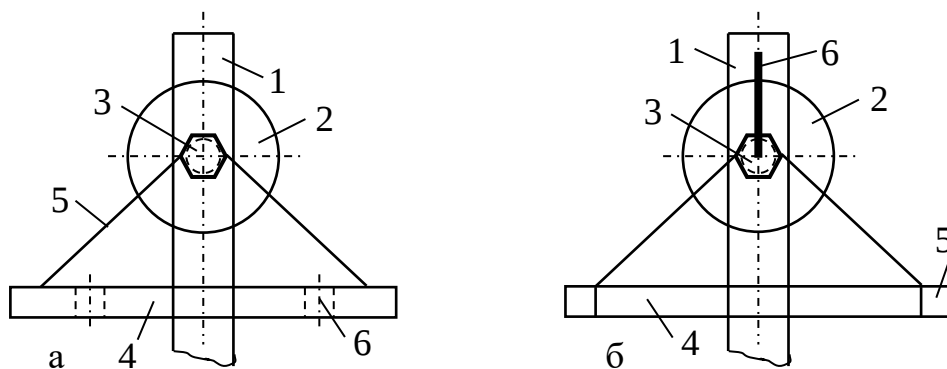


Рисунок 2.2 – Схема кріплення лотка: а – у вигляді перфорованої поверхні з отворами, 1 – стяжка; 2 – підшипник; 3 – вісь; 4 – лоток; 5 – пруток; 6 – отвір; б – у вигляді прямокутної гладкої поверхні, 1 – стяжка; 2 – підшипник; 3 – вісь; 4 – лоток; 5 – обмежувальний борт; 6 – фіксатор повороту осі

Установка для вирощування гідропонної продукції працює таким чином.

При вирощуванні салату гідропонним методом. Перед запуском пристрою здійснюється закладання посівного матеріалу в гідропонні стакани,

які встановлені в отвори 6 (рис. 2.2а) перфорованих лотків 9 (рис. 2.1) та заливається гідропонний живильний розчин у встановлену ємність 10.

У подальшому при обертанні вала 1 прямокутні лотки 9 з посівним матеріалом або перфоровані лотки 9 з гідропонними стаканами рухаються поступально коловою траєкторією, проходячи послідовно повз джерела опромінення.

При цьому корені гідропонних рослин, що знаходяться в гідропонних стаканах, встановлених в отворах перфорованих лотків 9, періодично занурюються у гідропонний розчин у ємності 10.

При подальшому русі лотків краплини гідропонного розчину, що стікають із коренів гідропонних рослин, потрапляють на розчинозбірник 11 і його похилою поверхнею стікають до ємності 10.

Залежно від виду вирощуваних рослин вибирається швидкість обертання вала 1 пристрою.

Обертання може бути неперервним, або періодичним із зупинками, необхідними для живлення коренів рослин, які занурені у гідропонний розчин у ємності 10.

Після закінчення необхідного терміну вирощування продукції на кожному перфорованому лотку 9 здійснюється заміна посівного матеріалу або гідропонних стаканів з рослинами.

При вирощуванні мікрозелені.

Перед запуском пристрою фіксують провертання осей 3 (рис. 2.2б) фіксаторами 6 та здійснюється закладання посівного матеріалу на гладку прямокутну поверхню лотка 9 (рис. 2.1).

Обертають вал 1 (рис. 2.1) на певний кут за часовою стрілкою (що рівнозначно провертанню осей 3 (рис. 2.2б) та лотків 4 на той же кут, а потім обертають вал 1 проти часової стрілки на подвійний кут, або кут який близький до нього.

В результаті повертання лотків на певний кут в протилежні сторони відносно горизонталі посівний матеріал переміщується від одного борту 5

прямокутної поверхні до другого борту, що спричиняє його рівномірне розшарування на поверхні лотків. Після вирівнювання посівного матеріалу знімають фіксатори 6, (рис. 2.2б), що дозволяє лоткам здійснювати вільні коливання шляхом повертання осі 3.

У подальшому при обертанні вала 1 прямокутні лотки 9 з посівним матеріалом рухаються поступально коловою траєкторією, проходячи послідовно повз джерела опромінення, при цьому в прямокутні лотки одночасно, періодично та дозовано подається живильний розчин за методом «стікаючих відходів».

Залежно від виду вирощуваних рослин вибирається швидкість обертання вала 1 пристрою. Обертання може бути неперервним, або періодичним із зупинками, необхідними для живлення коренів рослин методом «стікаючих відходів».

При подальшому русі лотків залишковий живильний розчин стікає із коренів гідропонних рослин і потрапляє на розчинозбірник 11 та по похилій поверхні розчинозбірника стікає до ємності 10.

Після закінчення необхідного терміну вирощування продукції здійснюється вивантаження готової продукції з кожного прямокутного лотка 9 та відповідна заміна нового посівного матеріалу.

Розроблена гідропонна установка є багатоярусною конструкцією, на кожному ярусі якої розташований лоток, на якому відбуваються такі процеси:

- розподілу посівного матеріалу;
- пророщування посівного матеріалу;
- вивантаження вирощеної зеленої гідропонної продукції.

Отже, пристрій має просту полегшену конструкцію, де відсутні спеціальні пристрої для поливу вирощуваних рослин, досить складні схеми керування, які узгоджують їхню роботу з обертанням призми з лотками та рослинами на них.

2.2. Моделювання процесу мінерального живлення рослин під час вирощування салату гідропонним методом

Одним із важливих факторів високої продуктивності вирощування овочевих культур методом малооб'ємної системи виробництва овочів є точна та своєчасна подача мінерального живлення до їх кореневої системи. При гідропонному вирощуванні всі мінеральні речовини рослини отримують з їх водних розчинів.

В закритому ґрунті водний режим потрібно регулювати з урахуванням біологічних особливостей культури, фази росту та інтенсивності освітлення.

При математичному описі системи живлення рослин в процесі крапельного зрошення, як об'єкта дослідження процесу керування концентрацією живильного розчину в субстраті, необхідно встановити динамічну залежність концентрації розчину від його подачі та інтенсивності вологообміну рослин в шарі теплиці [149].

Розрахункова модель коренежиттєвого середовища однієї рослини 1, яка представлена у вигляді графічної моделі (рис. 2.3) являє собою об'єм субстрату, який обмежений циліндричною поверхнею 2 (оболонкою) та заповнений об'ємом V_{ck} субстрату 3 (дисперсним матеріалом) з пористістю ε_o , де рівномірно розгалужена коренева система 4 рослини [149].

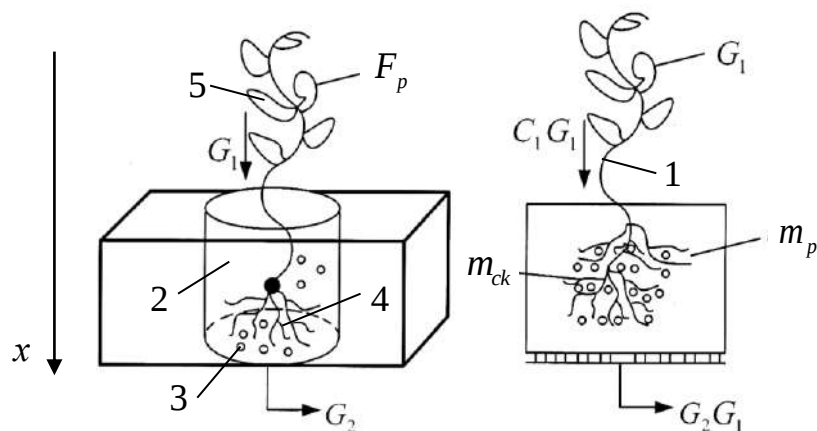


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема графічної моделі об'єкта коренежиттєвого середовища рослини: 1 – рослина; 2 – поверхня живлення коріння рослин; 3 – субстрат; 4 – коренева система; 5 – листова система

Процес мінерального живлення, або подача мінерального розчину до кореневої системи рослин відбувається періодично крапельним способом. Розчин, що поступає рівномірно розосереджується в поперечному перетині контейнера і рухається вертикально вниз, при цьому частина розчину поглинається (абсорбується) дисперсною твердою фазою рослинного матеріалу, а решта розчину відводиться в дренаж.

Для узагальнення принципів регулювання подачі поживних розчинів рослинам закритого ґрунту потрібно розробити реальну математичну модель процесу збереження речовини в системі «потік рідини-дисперсна насадка» та еквівалентні передаточні функції, що дозволить вибрати раціональний спосіб управління.

При цьому приймаємо припущення, що:

- дисперсні розподілені частинки, які є однакової маси або однакового розміру в об'ємі потоку є безперервно розподіленими;
- джерела та стоки речовини безперервно та рівномірно розподілені в об'ємі насадки субстрату;
- процес масообміну або перенесення речовини (інгредієнта) із рідкої фази в тверді частинки (процес абсорбції) на протязі певного часу є несталим;
- поле концентрації в твердій фазі не розглядається;
- нерухомий шар субстрату по відношенню до розподілу концентрації перенесеної речовини в рухому середовищі відіграє роль стоку або переходу речовини в шар, а сам субстрат розглядається як буферна ємність в якому концентрація менша;
- рух живильного розчину є одномірним;
- концентрація адсорбенту в середині твердої фракції розподілена рівномірно.

Поле концентрації перенесення речовини в рідині, яка переміщується скрізь шар у визначеному напрямку наприклад, відносно осі x , описується диференціальним рівнянням в часткових похідних конвективного переносу для однієї течії, яке має вигляд [149]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + g_x \frac{\partial C_i}{\partial x} = D_{ef} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{r_i}{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

де C_i – концентрація речовини в одиниці об'єму рідкої фази, кг/м³;

g_x – швидкість руху речовини в просторовому тілі, м/с;

r_i – потужність джерела i -ї речовини;

ε – пористість субстрату з корінцями.

Якщо перенос речовини відбувається шляхом дифузії, то для шару, який утворено частинками однакового розміру, потужність джерела i -ї речовини, або маса речовини, яка переходить до одиниці об'єму шару субстрату за одиницю часу τ визначається за формулою [150]:

$$r_i = -(1 - \varepsilon) \frac{\partial C_T}{\partial \tau}, \quad (2.2)$$

де C_T – концентрація речовини в об'ємі твердої фази, кг/м³;

τ – час переносу речовини, с.

Властивість поглинання вологи кореневою системою за малий період часу (за добу) дорівнює властивості надгрунтової частини рослин випаровувати вологу. Ізотерма абсорбції апроксимується лінійною залежністю.

З урахуванням зроблених допущень концентрації адсорбенту в живильному розчині та в твердих фазах (кореневої системи), а також динаміка процесів масообміну буде описана системою відповідно, рівнянь збереження та масообміну [149]:

$$\begin{cases} \varepsilon \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + g_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + (1 - \varepsilon) \rho_2 \frac{\partial C_T}{\partial \tau} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} + \frac{\partial C}{\partial r}; \\ (1 - \varepsilon) \rho_2 \frac{\partial C_T}{\partial \tau} = \beta F_i (C - C^*) \end{cases}, \quad (2.3)$$

де C – концентрація речовини в одиниці об'єму рідкої фази, кг/м³;

ρ_2 – густина сухої речовини адсорбенту, кг/м³;

C^* – концентрація адсорбенту в рідкій фазі, яка рівноважна її значенню в твердій фазі, кг/м³;

β – швидкість концентрації масообміну, м/с;

F_i – поверхня в одиниці об'єму субстрату, м²/м³.

Якщо ізотерма абсорбції апроксимується лінійною залежністю, тоді концентрацію адсорбенту C^* в рідкій фазі, яка рівноважна її значенню в твердій фазі, в першому наближенні також можна знаходити за лінійною залежністю [151]:

$$C^* = K_a C_T, \quad (2.4)$$

де K_a – постійний коефіцієнт адсорбції рівноваги сухої речовини, м³/кг.

Для математичного опису процесів масопереносу, який супроводжується випаровуванням вологи з поверхні твердої фази перше рівняння системи (2.3) необхідно доповнити складовою у вигляді об'ємного джерела, відповідно до кількості випареної вологи, а явний вигляд об'ємних джерел або стоків визначається фізичною картиною процесу [152].

Це означає, що ефект граничних умов на поверхні вноситься в перше рівняння збереження системи (2.3).

При цьому, якщо з одиниці субстрату 3 (рис. 2.3) включно з кореневою частиною 4 рослини 1 за одиницю часу з потоку виноситься або вноситься певна кількість речовини q_w , тоді в праву частину рівняння (2.3) необхідно вписати цей додатковий член q_w .

У нашому випадку з одиниці об'єму субстрату 3 (рис. 2.1), включаючи кореневу систему 4 виводиться певна кількість речовини, яку можна з певним ступенем подільності прирівняти до кількості вологи, що випаровується з листової частини 5.

При цьому вважаємо, що маса рослини на протязі добових змін навколишнього середовища є незмінною, або постійною, тобто вся поглинена кореневою системою волога випаровується назовні.

Тоді до другого рівняння масообміну системи (2.3) додаємо складову, яка визначає інтенсивність відведення вологи q_o (кг/с·м²) із кореневої системи, тобто:

$$q_o = G_w / V_{ck}, \quad (2.5)$$

де G_w – здатність випаровування рослини, або інтенсивність випаровування вологи з рослини, кг/с;

V_{ck} – одиниця об'єму поглинальної частини субстрату, м³.

Зважаючи на те, що явище інтенсивності масообміну є надзвичайно складним процесом, який залежить від багатьох змінних і значної кількості характеристичних факторів, наприклад, таких як біоенергетичні властивості та характеристики рослин тощо [153], швидкість процесу дифузії в рідкій фазі характеризується коефіцієнтами масопередачі, а кількісною характеристикою служить кінетична константа адсорбції K_a , яка може бути визначена тільки експериментально [154].

У практичній площині проведення аналізу динаміки адсорбції або процесів, які відбуваються у нерухомому шарі при протіканні рідини використовують спрощені апроксимуючі вирази для швидкості адсорбції в елементарному шарі субстрату [154]:

$$\frac{\partial C_T}{\partial \tau} = K_a (C - C_T). \quad (2.6)$$

Застосування рівняння (2.6) дозволяє уникати необхідності визначення коефіцієнта β швидкості концентрації масообміну та площі F_i поверхні в одиниці об'єму субстрату.

Ці величини можна визначати шляхом прирівнювання рівняння (2.4) та рівняння (2.6).

Приплив поживних речовин в кореневу систему рослини відбувається шляхом передачі через поверхню розподілу від розчину до твердої фази.

Відтік рідини з кореневої частини відбувається шляхом переміщення

вологи до листової частини і випаровуванням в повітря.

Тоді систему рівнянь (2.3) збереження для розчину та масообміну для субстрату можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + g_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) = (1 - \varepsilon) \rho_o \frac{\partial C_T}{\partial \tau}; \\ (1 - \varepsilon) \rho_o \frac{\partial C_T}{\partial \tau} = K_a (C - K_a C_T) - \frac{G_w}{V_{ck}} \end{cases} \quad (2.7)$$

Отримана система рівнянь (2.7) визначає динаміку процесів масообміну в субстраті з корінням рослини з урахуванням здатності випаровування листової частини рослини.

Система рівнянь (2.7) в частинних похідних точного аналітичного розв'язку немає, тому для спрощення процесу вводимо додаткові припущення:

- вираз $\varepsilon \omega_x \frac{\partial C}{\partial \tau}$ визначає різницю внесеної в шар субстрату та виділеної з нього кількості речовини;

- оскільки висота шару субстрату незначна, тоді приймаємо лінійний розподіл концентрації по висоті шару субстрату, або градієнт концентрації запишемо в кінцевій величині, яка визначається залежністю [155]:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_1 - C_2}{H_u}, \quad (2.8)$$

де H_u – висота шару субстрату, м;

- величина пористості ε є відношенням об'єму, який займає рідина до об'єму всього шару субстрату та визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_p + V_T}, \quad (2.9)$$

де V_p – об'єм розчину, м³;

V_T – об'єм твердої фази, м³.

Тому значення ε можна вписати до рівнянь системи (2.7) масової витрати розчину та маси рідини й субстрату в шарі.

З урахуванням припущень і за допомогою методу усереднення параметрів (лінійна залежність зміни концентрації по висоті шару субстрату) запишемо систему рівнянь (2.3) в звичайних похідних:

$$m_1 \frac{dC_2}{d\tau} = G_w (C_1 - C_2) + K_a (K_p C_T - 0,5C_1 - 0,5C_2); \quad (2.10)$$

$$m_2 \frac{dC_T}{d\tau} = K_a (0,5C_1 + 0,5C_2 - K_p C_T) - \frac{1}{V_c} G_w, \quad (2.11)$$

де m_1, m_2 – маса розчину і субстрату в ємності, кг;

C_1, C_2 – концентрація мінеральних речовин на вході і виході (дренажу) із шару субстрату (кг/м³).

Витрату свіжого розчину і дренажу визначають з рівняння матеріального балансу, яке записано у вигляді:

$$G_1 C_1 - G_w C_1 - G_2 C_2 = C_1 (G_1 - G_w) - G_2 C_2 = 0. \quad (2.12)$$

Для виключення з рівняння (2.10) невідомих додаткових змінних застосуємо принцип поняття виведення поживної речовини з розчину, який передбачає формулювання, що коефіцієнт виведення дорівнює відношенню $\chi = C_1 / C_2$ є сталою величиною та визначається експериментально шляхом аналізу рівняння $G(C_1 - \chi C_2) - C_1 G_w = 0$ [156].

Сталими параметрами в рівнянні (2.12) є маса розчину m_1 в субстраті, маса сухого субстрату m_2 , коефіцієнти K_a, K_p , об'єм V_{ck} , а змінними – концентрації C_1, C_2 , витрати розчину G та здатність випаровування G_w .

Змінні параметри об'єкта дослідження запишемо у вигляді суми їх значень у встановленому режимі x_{i0} та приросту Δx_i .

При цьому представлені змінні параметри об'єкта управління в приростах мають вигляд:

$$C_1 = C_{10} + \Delta C_1; \quad C_2 = C_{20} + \Delta C_2; \quad G = G_0 + \Delta G; \quad G_w = G_{w0} + \Delta G_w. \quad (2.13)$$

Підставимо значення змінних параметрів в рівняння (2.8) і (2.9) та після

перетворення й спрощення (нехтуючи складовими малосності другого порядку та відношенням рівнянь статики, за яких $dC_T / d\tau = dC_2 / d\tau$), отримаємо запис математичної моделі процесу або рівнянь у приростах:

$$T_1 \frac{d\Delta C_2}{d\tau} + \Delta C_2 = K_1 \Delta C_1 + K_2 \Delta G + K_3 \Delta C_T; \quad (2.14)$$

$$T_2 \frac{d\Delta C_T}{d\tau} + \Delta C_T = K_4 \Delta C_1 + K_5 \Delta C_2 + K_6 \Delta G_w, \quad (2.15)$$

де $T_1 = \frac{m_1}{G + 0,5K_c}; \quad T_2 = \frac{m_2}{K_a K_p}; \quad K_1 = \frac{G - 0,5K_a}{G + 0,5K_a}; \quad K_2 = \frac{C_1 - C_2}{G + 0,5K_a};$
 $K_3 = \frac{K_a K_p}{G + 0,5K_a}; \quad K_4 = K_5 = \frac{0,5}{K_p}; \quad K_6 = \frac{1}{V_{ck} K_a K_p}.$

Застосувавши до змінних диференціальних рівнянь (2.14) і (2.15) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, отримаємо систему рівнянь в операторній формі [149]:

$$\begin{cases} (T_1 p + 1) \Delta C_2(p) = K_1 \Delta C_1(p) + K_2 \Delta G(p) + K_3 \Delta C_T(p); \\ (T_2 p + 1) \Delta C_T(p) = K_4 \Delta C_1(p) + K_5 \Delta C_2(p) + K_6 \Delta G_w(p); \end{cases} \quad (2.16)$$

Рішення системи рівнянь (2.16) представлено у вигляді передаточних функцій згідно з структурною схемою (рис. 2.4) по каналах керування та збурення [149]:

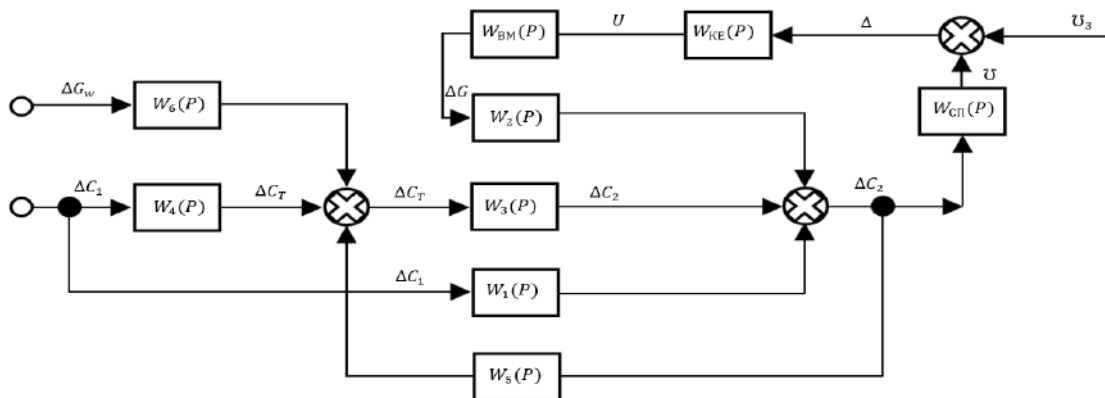


Рисунок 2.4 – Структурна схема лінійної математичної моделі системи мінерального живлення рослин в теплиці

$$W_1(p) = \frac{\Delta C_2(p)}{\Delta C_1(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}; W_2(p) = \frac{\Delta C_2(p)}{\Delta C_1(p)} = \frac{K_2}{T_1 p + 1}; W_3(p) = \frac{\Delta C_2(p)}{\Delta C_T(p)} = \frac{K_3}{T_1 p + 1}; \quad (2.17)$$

$$W_4(p) = \frac{\Delta C_T(p)}{\Delta G_w(p)} = \frac{K_4}{T_2 p + 1}; W_5(p) = \frac{\Delta C_T(p)}{\Delta C_2(p)} = \frac{K_5}{T_2 p + 1}; W_6(p) = \frac{\Delta C_T(p)}{\Delta G_w(p)} = \frac{K_6}{T_2 p + 1}. \quad (2.18)$$

Для визначення впливу вологообміну листостеблової маси рослини з повітря шатра теплиці на відтік води з кореневої системи складемо рівняння теплового балансу для рослини та повітря.

При формалізації процесу приймаємо такі припущення:

- теплофізичні характеристики середовища та матеріалів є незалежними від температури та часу й дорівнюють середнім значенням за період процесу;
- тепловіддача від системи трубного опалення визначається потужністю системи обігріву та визначається за формулою:

$$P_{TP} = G_T C_T (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (2.19)$$

де $G_T C_T$ – теплова ємність теплоносіїв;

Θ_1, Θ_2 – температура теплоносія на вході та виході трубного реєстру, $^{\circ}\text{C}$;

- теплота передається конвенцією за законом Ньютона, а вологообмін відбувається за законом Дальтона;
- передача теплоти випромінювання враховується коефіцієнтами.

З урахуванням прийнятої формалізації процесу рівняння теплового та матеріального балансу приймають вигляд:

- для повітря теплиці

$$m_v c_v \frac{dt_v}{d\tau} = P_{TP} - K_z F_z (t_v - \Theta_z) + a_k F_p (t_v - \Theta_p); \quad (2.20)$$

- для рослинного покриву

$$m_p c_p \frac{d\Theta_p}{d\tau} = I_p \tau + \hat{F} a_k F_p (t_v - \Theta_p) - r_0 \beta_p F_p (a \Theta_p + c - b d_v); \quad (2.21)$$

- матеріальний баланс повітря

$$m_v \frac{dd_v}{d\tau} = \beta_p F_p (a\Theta_p + c - bd_v), \quad (2.22)$$

де t_v , Θ_z , Θ_p – температура повітря в теплиці, температура зовнішнього повітря, температура рослини, ^0C ;

P_{TP} – потужність трубчастого нагріву, Вт;

I_p – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²;

a_k , K_z – коефіцієнт теплообміну та теплопередачі, Вт/м² ^0C ;

β_p – коефіцієнт вологообміну, кг/м² год.;

r_o – питома теплота пароутворення, Дж/кг;

d_v – вологовміст повітря, кг/кг с.п.;

τ – поглинена здатність рослин;

F_z , F_p – площа вікон і рослини, м²;

a , b , c – коефіцієнти апроксимації залежності тиску від температури.

Після перетворення запису рівнянь динаміки у приростах та віднімання рівнянь статички й нехтуванням незначущими членами другого порядку, рівняння матеріального балансу приймають вигляд:

- для повітря теплиці

$$m_v c_v \frac{d\Delta t}{d\tau} = \Delta P_{TP} - K_z F_z \Delta t_z + F_p \Theta_p (K_z F_z + a_k F_p) \Delta t; \quad (2.23)$$

- для рослинного покриву

$$m_p c_p \frac{d\Delta \Theta_p}{d\tau} = \Delta I_p \tau + F_p a_k \Delta t_v - (a_k F_p + r_o \beta_p) \Theta_p + r_o \beta_p F_p b \Delta d_v; \quad (2.24)$$

- матеріальний баланс повітря

$$m_v \frac{d\Delta d_v}{d\tau} = \beta_p F_p a \Theta_p - \beta_p F_p b \Delta d_v + \Delta G_{w3}, \quad (2.25)$$

де G_{w3} – продуктивність системи зволоження повітря, кг/год.

Після лінеаризації рівнянь (запису їх в приростах) і застосування перетворення Лапласа при нульових початкових умовах отримані рівняння у вигляді:

$$\begin{cases} (T_3 p + 1) \Delta t(p) = K_7 \Delta P_{TP} + K_8 \Delta \Theta_z + K_9 \Delta \Theta_p; \\ (T_4 p + 1) \Delta \Theta_p(p) = K_{10} I_p + K_{11} \Delta t_v + K_{12} \Delta d_v; \\ (T_5 p + 1) \Delta d_v(p) = K_{13} \Delta \Theta_p + K_{14} \Delta G_{w3} \end{cases} \quad (2.26)$$

З рівнянь системи (2.26) отримаємо передаточні функції об'єкту по окремих каналах керування з керуючими впливами ΔP_{TP} та канал ΔG_{w3} і зовнішніх збурень $\Delta \Theta_z$ і ΔI_p [149]:

$$W_7(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta P_{TP}} = \frac{K_7}{T_3 p + 1}; \quad W_8(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta \Theta_z(p)} = \frac{K_8}{T_3 p + 1}; \quad (2.27)$$

$$W_9(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta \Theta_p(p)} = \frac{K_9}{T_3 p + 1}; \quad W_{10}(p) = \frac{\Delta \Theta_p(p)}{\Delta I_p(p)} = \frac{K_{10}}{T_4 p + 1}; \quad (2.28)$$

$$W_{11}(p) = \frac{\Delta_p \Theta(p)}{\Delta t_v(p)} = \frac{K_{11}}{T_4 p + 1}; \quad W_{12}(p) = \frac{\Delta \Theta_p(p)}{\Delta d_v(p)} = \frac{K_{12}}{T_4 p + 1}; \quad (2.29)$$

$$W_{13}(p) = \frac{\Delta d_v(p)}{\Delta \Theta_p(p)} = \frac{K_{13}}{T_5 p + 1}; \quad W_{14}(p) = \frac{\Delta d_v(p)}{\Delta G_{w3}(p)} = \frac{K_{14}}{T_5 p + 1}, \quad (2.30)$$

$$\text{де } T_3 = \frac{m_v}{k_{o3}}; \quad T_4 = \frac{m_p C_p}{k_{o4}}; \quad T_5 = \frac{m_v}{k_{o5}}; \quad k_{o3} = K_z F_z + a_k F_p; \quad k_{o4} = a_k F_p + a r_o \beta_p F_p; \quad k_{o5} = b \beta_p F_p;$$

$$K_7 = \frac{1}{k_{o3}}; \quad K_8 = \frac{K_z F_z}{k_{o3}}; \quad K_9 = \frac{a_k F_p}{k_{o3}}; \quad K_{10} = \frac{\tau \hat{F}_p}{k_{o4}}; \quad K_{11} = \frac{a_k F_p}{k_{o4}}; \quad K_{12} = \frac{b r_o \beta_p F_p}{k_{o4}};$$

$$K_{13} = \frac{a \beta_p F_p}{k_{o4}}; \quad K_{14} = \frac{1}{k_{o5}}; \quad K_{15} = a \beta_p F_p; \quad K_{16} = -b \beta_p F_p.$$

При цьому кількість вологи, яка відділяється з листової частини рослини визначається за формулою:

$$\Delta G_w = K_{15} \Delta \Theta_p + K_{16} \Delta d_v. \quad (2.31)$$

На основі системи рівнянь (2.30) та передаточних функцій (2.27) (2.30) побудовано схему лінійної математичної моделі температурного вологісного режиму (повітряного об'єму) теплиці системи трубного опалення в приміщенні закритого ґрунту у вигляді структурної схеми, рис. 2.5 [149].

Для дослідження перехідних процесів об'єкта дослідження розв'яжемо систему рівнянь (2.26) відносно T_1 та T_2 , тобто:

$$T_1 \frac{dC_2}{d\tau} + a_1 C_2 - b_1 = C_T; \quad (2.32)$$

$$T_2 \frac{dC_T}{d\tau} + a_2 C_T - b_2 = C_2; \quad (2.33)$$

де $T_1 = \frac{m_1}{K_c K_p}$; $T_2 = \frac{m_2}{K_c}$; $a_1 = \frac{G + 0,5K_c}{K_c K_p}$; $b_1 = \frac{G - 0,5K_c}{K_c K_p}$; $a_2 = 0,5K_p$;
 $b_2 = \frac{K_c - 0,5K_p}{K_c} + \frac{G_w}{K_c}$.

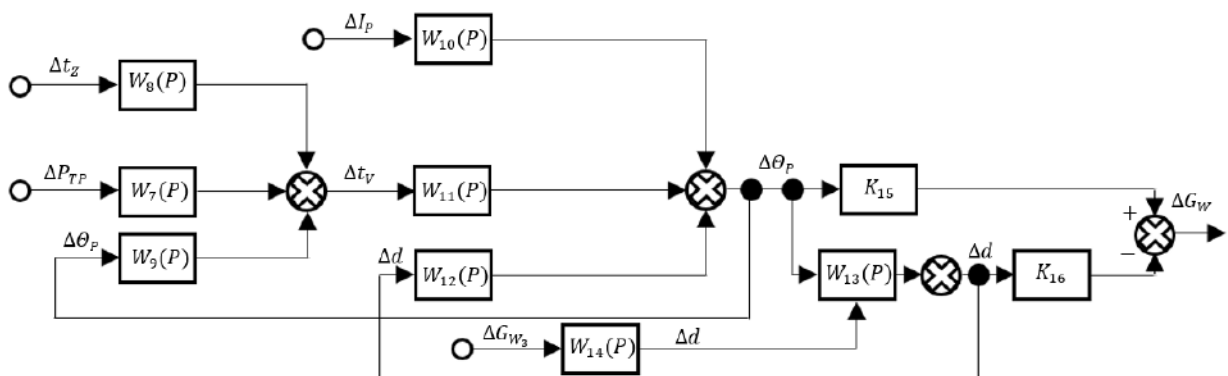


Рисунок 2.5 – Структурна схема математичної моделі динаміки кінематичних параметрів у приміщенні закритого ґрунту

Розв'язок системи рівнянь (2.26) відносно $C_2(\tau)$ та $C_T(\tau)$ має вигляд:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 C_2}{d\tau^2} + (a_1 T_2 + a_2 T_1) \frac{d C_2}{d\tau} + (a_1 a_2 - 1) C_2 = b_2 + b_1 a_2; \quad (2.34)$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 C_T}{d\tau^2} + (a_1 T_2 + a_2 T_1) \frac{d C_T}{d\tau} + (a_1 a_2 - 1) C_T = b_2 + b_1 a_1. \quad (2.35)$$

Розв'язок однотипних рівнянь отримаємо у вигляді суми розв'язків однорідного часткового рівняння:

$$C_2(\tau) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + \frac{D_1}{C}; \quad (2.36)$$

$$C_T(\tau) = C_3 e^{r_1 \tau} + C_4 e^{r_2 \tau} + \frac{D_2}{C}, \quad (2.37)$$

де C_3, C_4 – сталі інтегрування;

$$r_1 = r_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \text{ – корені характеристичного рівняння.}$$

При цьому введемо позначення:

$$A = T_1 T_2; \quad B = a_1 T_2 + a_2 T_1; \quad C = a_1 a_2 - 1; \quad D_1 = b_2 + b_1 a_2; \quad D_2 = b_1 + b_2 a_1. \quad (2.38)$$

Сталі інтегрування отримаємо з початкових умов: $\tau = 0$; $C_2 = C_{20}$;

$$C_T = C_{T0}; \quad dC_2 / d\tau = dC_T / d\tau = 0.$$

Після підстановки визначених значень сталих інтегрування C_3, C_4 з початкових умов у відповідні рівняння та після перетворення та спрощення, отримали рівняння перехідного процесу зміни концентрацій речовини в розчині та кореневій системі рослини:

$$C_2(\tau) = \frac{C_{20} - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} + r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}; \quad (2.39)$$

$$C_T(\tau) = \frac{C_{T0} - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} + r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}. \quad (2.40)$$

Згідно з рівняннями (2.39) і (2.40) побудовані графічні відтворення залежності зміни концентрацій розчину на вході кубика з кореневим субстратом при керівних діях у вигляді зміни подачі розчину $\Delta G(\tau)$ або збурення у вигляді зміни відтоку розчину через листову частину рослини $G(\tau)$, які наведено на рис. 2.6.

У результаті аналізу, отримано рівняння матеріального балансу живильного розчину від освітленості:

$$\frac{V_m}{G_1 - q_w} \frac{dC_2}{d\tau} = \frac{G_1 C_1 - q_w C_r}{G_1 - q_w}, \quad (2.41)$$

де G_1 – витрати розчину на вході лотка; q_w – інтенсивність сонячного випромінювання, кЛюкс; G_r – концентрація поглинутого рослиною розчину, мсм/см²; C_1 – концентрація розчину на вході в кубик із субстратом.

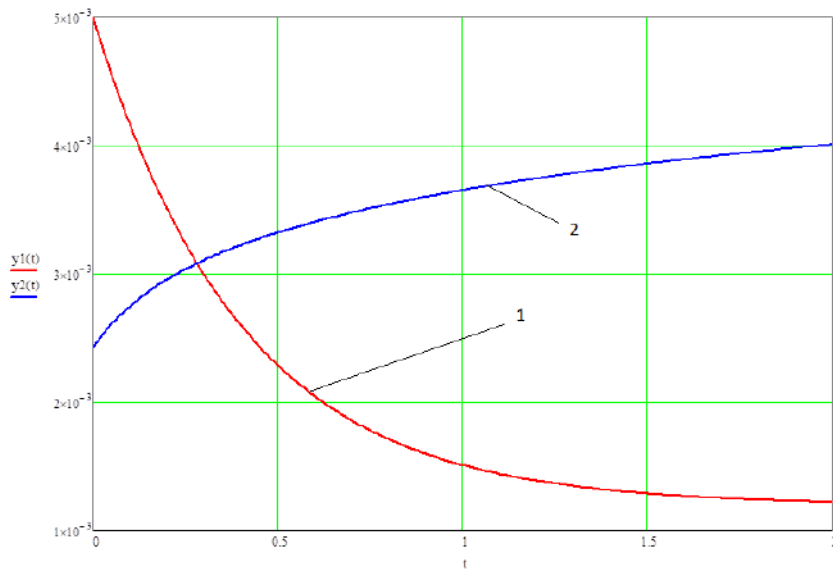


Рисунок 2.6 – Зміна концентрацій розчину на вході кубика з кореневим субстратом залежно від часу: 1 – подачі розчину $\Delta G(\tau)$; 2 – відтоку розчину через листову частину рослини $G(\tau)$

Розв'язок однотипних рівнянь отримано у вигляді суми розв'язування однорідного частинного рівняння:

$$C_2(\tau) = a - (a - C_1)e^{\tau/T}. \quad (2.42)$$

На рис. 2.7 наведено графічну інтерпретацію зміни концентрації розчину на вході залежно від часу та інтенсивності сонячного випромінювання.

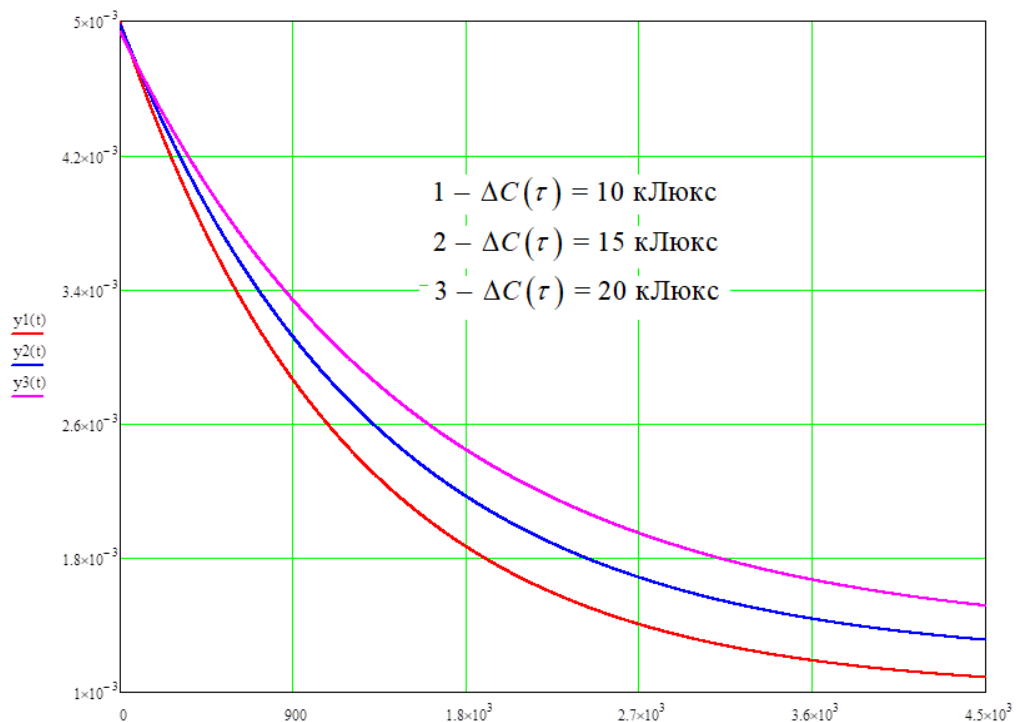


Рисунок 2.7 – Зміна концентрації розчину залежно від часу

Отримані математичні моделі та побудовані на їх основі структурні схеми послужать основою для створення системи мінерального живлення рослин в закритому ґрунті.

2.3. Математична модель процесу переміщення посівного матеріалу в прямокутному лотку гідропонної установки

Для визначення раціональних параметрів і режимів роботи гідропонної установки під час вирощування мікрозелені необхідно розробити детерміновану математичну модель, яка описує та характеризує функціональну залежність зміни процесу переміщення посівного матеріалу або шару насіння, яке розміщується на вегетаційній гладкій поверхні прямокутного лотка 9 (рис. 2.1) гідропонної установки.

Першою операцією виробництва мікрозелені гідропонним способом є операція завантаження посівного матеріалу на вегетаційну поверхню лотка 9 (рис. 2.1) та його подальше рівномірне розосередження по всій площі вегетаційної поверхні лотка гідропонної установки з однаковою висотою шару насіння для ефективного агробіологічного пророщування.

Для проведення аналізу процесу рівномірного розосередження посівного матеріалу по поверхні прямокутного лотка складено розрахункову схему, яку наведено на рис. 2.8.

Нехай на поверхню лотка 3 (рис. 2.8), площа якого дорівнює $S_{\text{л}} = \text{const}$ (м²) завантажено насіння посівного матеріалу 4 деякого об'єму $V_{\text{н}} = \text{const}$ (м³), який розташовується біля одного обмежувального борту 6, займаючи деяку вихідну площу завантаження $S_{\text{з}} = \text{const}$ (м²), при цьому густина посівного матеріалу або шару насіння на всьому шляху його переміщення є постійною $\gamma_{\text{н}} = \text{const}$ (кг/м³).

Процес рівномірного розосередження посівного матеріалу по поверхні лотка відбувається у двох випадках за рахунок виконання таких послідовних операцій.

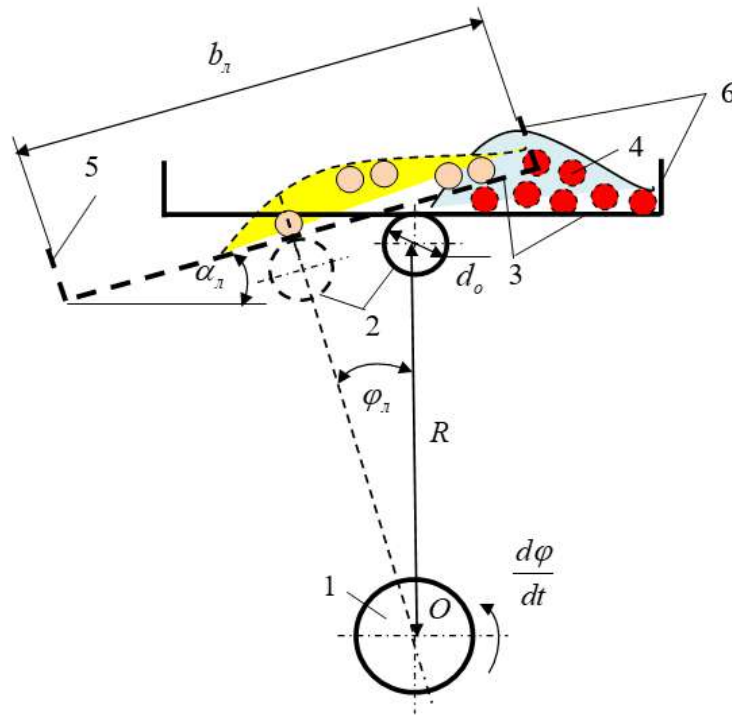


Рисунок 2.8 – Схема до розрахунку процесу рівномірного розосередження посівного матеріалу по прямокутній поверхні лотка: 1 – вал обертання призми гідропонної установки; 2 – нерухома вісь; 3 – прямокутний лоток; 4 – посівний матеріал; 5, 6 – обмежувальний борт.

Перший випадок:

- 1-ша операція: на поверхню лотка 1 (рис. 2.9а) завантажують насіння посівного матеріалу 2, який розташовують біля обмежувального борту 4;
- 2-га операція – перше коливання: обертають приводний вал 1 (рис. 2.8) або призму гідропонної установки та, відповідно, прямокутний лоток 1 (рис. 2.9а) з розташованим на ньому шаром посівного матеріалу 2, наприклад, проти часової стрілки на перший деякий кут " $-\varphi_{1,l} = -\alpha_{1,l}$ (рад.), рис. 2.9б; при цьому посівний матеріал 2 переміщується вниз по похилій площині лотка 1 із початкового положення від обмежувального борту 4 (рис. 2.9а) в протилежному напрямку до обмежувального борту 3;
- 3-тя операція: повертають приводний вал 1 (рис. 2.8) або лоток 1 (рис. 2.9б) за часовою стрілкою на кут " $-\varphi_{1,l} = -\alpha_{1,l}$ ", або у початкове положення за якого $\varphi_l = \alpha_l = 0$, рис. 2.5а;

- 4-та операція – друге коливання: обертають приводний вал 1 (рис. 2.8) або призму гідропонної установки, а відповідно, і прямокутний лоток 1 (рис. 2.10а) з частково розсередженим на ньому шаром посівного матеріалу 2 за часовою стрілкою, наприклад, на деякий кут $" +\varphi_{1л} " = +\alpha_{1л} = " -\varphi_{1л} " = -\alpha_{1л}$, рис. 2.10б; при цьому посівний матеріал 2 переміщується вниз по похилій площині лотка із початкового положення від обмежувального борту 3 (рис. 2.10а) в протилежному напрямку до обмежувального борту 4;

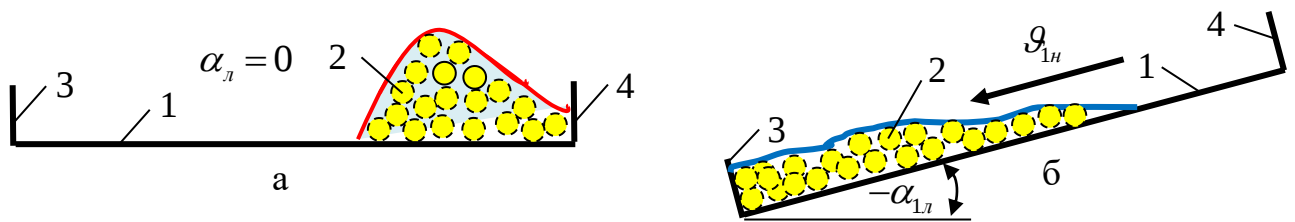


Рисунок 2.9 – Схема 1-ї та 2-ї операцій розосередження посівного матеріалу по поверхні лотка: 1 – лоток; 2 – посівний матеріал; 3, 4 – обмежувальний борт

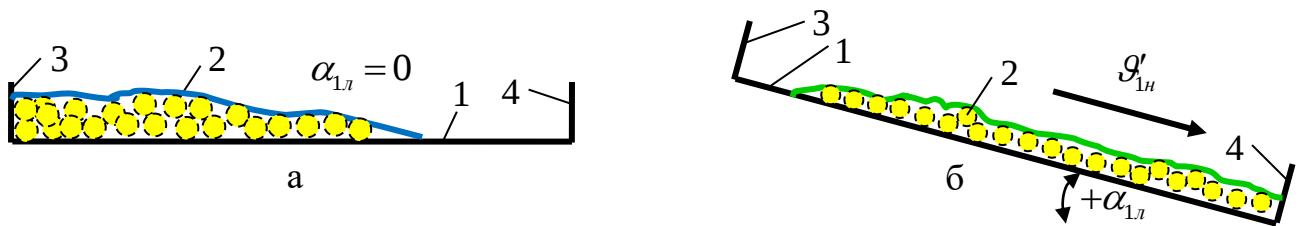


Рисунок 2.10 – Схема 3-ї та 4-ї операцій розосередження посівного матеріалу по поверхні лотка: 1 – лоток; 2 – посівний матеріал; 3, 4 – обмежувальний борт

- 5-та операція: повертають приводний вал 1 (рис. 2.8) або лоток проти часової стрілки на кут $" +\varphi_{1л} " = +\alpha_{1л} = " -\varphi_{1л} " = -\alpha_{1л}$, або у початкове положення за якого $\varphi_{л} = \alpha_{л} = 0$, рис. 2.11а;

- 6-та операція – третє коливання: обертають приводний вал 1 (рис. 2.8) або призму гідропонної установки, а відповідно, і прямокутний лоток 3 з розташованим на ньому шаром посівного матеріалу 4 проти часової стрілки на кут $" +\varphi_{1л} " = +\alpha_{1л} = " -\varphi_{1л} " = -\alpha_{1л}$, рис. 2.11б; при цьому посівний матеріал 2 переміщується вниз по похилій площині лотка із початкового положення від

обмежувального борту 3 (рис. 2.11а) в протилежному напрямку до обмежувального борта 4 та, наприклад, відносно матеріалу, який рівномірно розосередився по всій площі прямокутного лотка, рис. 2.11б;

У подальшому послідовність операцій обертання приводного вала 1 або призми гідропонної установки аналогічна попереднім операціям до того моменту, коли посівний матеріал 2 буде рівномірно розсереджений по всій площі вегетаційної поверхні прямокутного лотка 1.

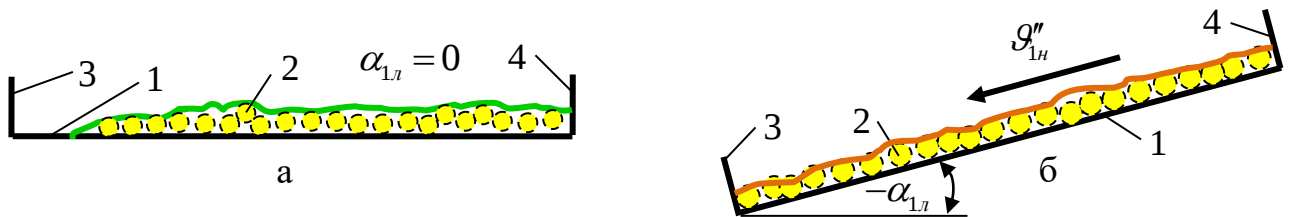


Рисунок 2.11 – Схема 5-ї та 6-ї операцій розосередження посівного матеріалу по поверхні лотка: 1 – лоток; 2 – посівний матеріал; 3, 4 – обмежувальний борт

Після рівномірного розосередження посівного матеріалу по всій поверхні лотка знімають фіксатор 6 (рис. 2.2); при цьому лоток з розосередженим посівним матеріалом займає горизонтальне положення.

Другий випадок буде відрізнятися від першого випадку тим, що у процесі виконання 4-ї операції, лоток 2 (рис. 2.9а) повертають на кут, який відмінний від кута $+\varphi_{1l} = \alpha_{1l} = -\varphi_{1l} = \alpha_{1l}$ та більший за нього, наприклад, на кут $+\varphi_{2l} = \alpha_{2l}$.

Далі послідовність виконання операцій аналогічна першому випадку.

У результаті коливання лотка 3 (рис. 2.8) відносно осі O приводного вала 1 у протилежні сторони, насіння 4 переміщується, наприклад, від одного обмежувального борту 5 гладкої прямокутної поверхні до іншого протилежного борту 6.

Крім того після певного n_l -го числа коливань лотка 3, або переміщень насіння 4, він рівномірно покриває всю поверхню лотка однакової висоти розподіленого шару насіння, який було завантажено на його поверхню.

З точки зору нерозривності сипучого потоку можна прийняти гіпотезу, що час розосередження посівного матеріалу до необхідної рівномірності залежить від основних параметрів – кута нахилу та кількості коливань поверхні лотка з врахуванням інших об'єктивних і суб'єктивних факторів, наприклад:

- вологості посівного матеріалу;
- виду поверхні лотка;
- частоти коливань лотка тощо.

Переміщення елементарної маси dm_n насіння вниз по похилій площині лотка може відбуватися шляхом зсуву початкового шару посівного матеріалу вниз відносно похилої площини лотка, шляхом подальшого зсуву утвореного суцільного шару посівного матеріалу, шляхом кочення посівного матеріалу або за рахунок комбінованого переміщення – одночасного зсуву та кочення посівного матеріалу по похилій площині лотка гідропонної установки.

За показник технологічної ефективності процесу рівномірного розосередження посівного матеріалу (у подальшому – насіння) по площі вегетаційної поверхні лотка приймаємо критеріальний показник, який охарактеризуємо, як коефіцієнт заповнення площі лотка (у подальшому – коефіцієнт заповнення) та який позначимо символом k_3 .

Фізичну суть коефіцієнта заповнення k_3 сформулюємо таким чином: коефіцієнт заповнення k_3 , є відношенням площі S_p (м²), яку займає розсереджене насіння після деякого i -го обертання лотка навколо осі вала 1 (рис. 2.8) до загальної площі S_n вегетаційної поверхні прямокутного лотка 3, або у загальному:

$$k_3 = S_p / S_n; \quad k_3 \leq 1. \quad (2.43)$$

Для обґрунтування коефіцієнта заповнення k_3 , або визначення площі S_p (м²), яку займає розсереджене насіння після деякого i -го обертання лотка розглянемо схему рис. 2.12.

Нехай у загальному випадку, в процесі обертання приводного вала 1 (рис.

2.12) на кут φ з частотою обертання $\omega_g = d\varphi / dt$ (рад/с), також відбувається обертання осі 2 на кут φ і відповідно, обертання лотка 3 на кут α_l (град.) з розміщеним на його вегетаційній прямокутній гладкій поверхні посівним матеріалом або шаром зернового насіння 4.

При цьому розглянемо рух елементарної маси dm_n насіння 4 (рис. 2.12), яка переміщується по похилій площині вегетаційної поверхні прямокутного лотка 3, який жорстко закріплений на нерухомій, відносно лотка 3, осі 2.

Приймаємо, що довжина прямокутного лотка дорівнює b_l , а його ширина – c_l , при цьому $b_n \gg c_n$.

На першому етапі розглянемо у загальному переміщення елементарної маси dm_n насіння 4 (рис. 2.12а) за рахунок зсуву початкового шару насіння вниз відносно похилої площини лотка 3, який повернуто на кут $\varphi = \alpha_l$.

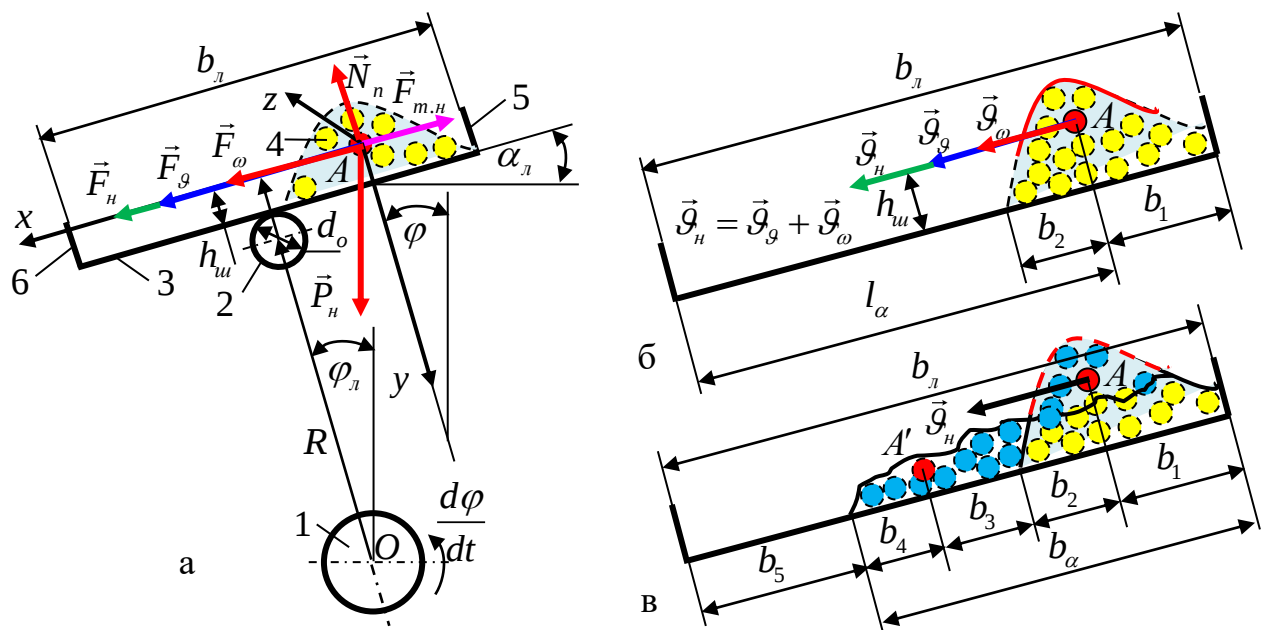


Рисунок 2.12 – Схема до розрахунку процесу переміщення верхнього шару посівного матеріалу: а – схема сил; б, в – схема зсуву та переміщення шару насіння; 1 – вал обертання призми гідропонної установки; 2 – нерухома вісь; 3 – прямокутний лоток; 4 – насіння; 5, 6 – обмежувальний борт.

Вибираємо систему координат, початок якої належить точці A , при цьому: точку A розташовуємо посередині висоти верхнього шару насіння 4; вісь

Ax направимо в напрямку переміщення елементарної маси dm_n , а вісь Ay і вісь Az – відповідно, перпендикулярно осі Ax і площині Axy .

На елементарну масу dm_n верхнього шару насіння 4 (рис. 2.12а) у процесі його переміщення вниз за рахунок зсуву шару насіння відносно похилої площини лотка 3 діють сили:

- сила F_ω , яка виникає у результаті обертання елементарної маси dm_n насіння з кутовою швидкістю $\omega_n = d\varphi_n / dt$, Н;
- сила F_g переміщення (зсув) елементарної маси dm_n насіння вниз по похилій площині лотка, яка виникає під дією сили земного тяжіння, Н;
- сила ваги P_n елементарної маси dm_n насіння, Н;
- N сила нормальної реакції елементарної маси dm_n поверхні площини лотка, Н;
- сила тертя $F_{т.н}$ насіння по поверхні лотка, Н.

При цьому у результаті одночасної дії моменту сили M_{F_ω} ($\text{кг}\cdot\text{м}^3/\text{с}^2$), або моменту інерції J_{F_ω} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$), який виникає від дії сили F_ω та сили F_g елементарна маса dm_n переміщується вниз по похилій площині з точки A з початковою результуючою швидкістю $\mathcal{G}_n$ (м/с) в точку A' в напрямку від одного борту до протилежного борту прямокутного лотка на деяку відстань, або проходячи деякий шлях, довжину якого позначимо через $l_{1\alpha} = b_2 + b_3$ (м), рис. 2.12б, в.

За час t (с) переміщення елементарної маси dm_n насіння на відрізку довжини шляху $l_{1\alpha} = b_2 + b_3$ її швидкість переміщення по поверхні прямокутного лотка змінюється від початкового $\mathcal{G}_n = \mathcal{G}_g + \mathcal{G}_\omega$ у точці A до кінцевого значення швидкості $\mathcal{G}'_n = 0$ у точці A' .

Для побудови математичної моделі переміщення та розподілення шару насіння по гладкій поверхні лотка складемо рівняння руху елементарної маси dm_n насіння на переміщенні dx :

$$\begin{cases} \vec{F}_x = \vec{F}_\omega + \vec{F}_g + \vec{F}_{m.H} + \vec{P}_H \sin \alpha_L = 0; \\ \vec{F}_y = \vec{P}_H \cos \alpha_L + \vec{N}_n = 0 \end{cases}, \quad (2.44)$$

або

$$\begin{cases} dm_H \frac{d\vartheta_g}{dt} + dm_H \frac{d^2\varphi_L}{dt^2} - N_H f_m + dm_H g \sin \alpha_L = 0; \\ dm_H g \cos \alpha_L = N_n \end{cases}. \quad (2.45)$$

Підставивши значення N_n з другого рівняння системи (2.44) в перше рівняння та після перетворення та спрощення, отримаємо:

$$\frac{d\vartheta_n}{dt} = \frac{d(\vartheta_g + \vartheta_\omega)}{dt} = g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L). \quad (2.46)$$

або

$$\frac{d^2 l_{1\alpha}}{dt^2} = g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L); \quad (2.47)$$

$$\frac{d^2(b_2 + b_3)}{dt^2} = g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L); \quad (2.48)$$

$$\frac{d\vartheta_n}{dt} = \frac{d^2(b_2 + b_3)}{dt^2} = g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L). \quad (2.49)$$

З врахуванням того, що $\frac{d\vartheta_n}{dt} = \frac{d(b_2 + b_3)}{dt}$, або $dt = \frac{d(b_2 + b_3)}{\vartheta_n}$ отримаємо:

$$\vartheta_n d\vartheta_n = g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L) dx. \quad (2.50)$$

Для визначення шляху переміщення елементарної маси dm_H насіння по поверхні прямокутного лотка, на якому швидкість руху елементарної маси dm_H змінюється від початкового значення $\vartheta_n = \vartheta_g + \vartheta_\omega$ до значення $\vartheta'_n = 0$, проінтегруємо ліву частину виразу (2.50), в межах від $\vartheta_n = \vartheta_g + \vartheta_\omega$ до $\vartheta'_n = 0$, а праву від 0 до $b_2 + b_3$:

$$\int_{\vartheta'_n=0}^{\vartheta_n=\vartheta_g+\vartheta_\omega} \vartheta_n d\vartheta_n = \int_{x=0}^{x=b_2+b_3} g(\cos \alpha_L f_m - \sin \alpha_L) dx. \quad (2.51)$$

Після інтегрування виразу (2.51), отримаємо:

$$\frac{\mathcal{G}_n^2 - (\mathcal{G}'_n)^2}{2} = g(b_2 + b_3)(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}}), \quad (2.52)$$

або

$$(\mathcal{G}_g + \mathcal{G}_\omega)^2 = 2g(b_2 + b_3)(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}}), \quad (2.53)$$

З рівняння (2.53) знаходимо шлях $b_2 + b_3$ переміщення елементарної маси dm_n насіння по поверхні прямокутного лотка, тобто:

$$b_2 + b_3 = \frac{(\mathcal{G}_g + \mathcal{G}_\omega)^2}{2g(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}})} = l_{1\alpha}. \quad (2.54)$$

Якщо прийняти, що $b_2 + b_3 = l_{1\alpha} = b_1 + b_4$ або $b_1 = b_2 = b_3 = b_4$, тоді можна записати, що $b_\alpha = b_1 + b_4 + b_2 + b_3 = 2l_{1\alpha}$.

Тоді згідно з рис. 2.12в площа S_p , яку займає розсерджене насіння після 1-го обертання навколо осі вала 1 та нахилу лотка вниз на кут $\alpha_{\text{л}}$ буде визначатися:

$$S_p = 2l_{1\alpha} c_{\text{л}} = \frac{c_{\text{л}} (\mathcal{G}_g + \mathcal{G}_\omega)^2}{g(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}})}. \quad (2.55)$$

Підставивши значення (2.55) в формулу (2.43) та зважаючи на те, що загальна площа поверхні прямокутного лотка $S_{\text{л}} = b_{\text{л}} c_{\text{л}}$, отримаємо залежність для визначення коефіцієнта заповнення k_3 :

$$k_3 = \frac{(\mathcal{G}_g + \mathcal{G}_\omega)^2}{gb_{\text{л}}(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}})}. \quad (2.56)$$

Прийнявши, що $\mathcal{G}_g = \frac{dl_{1\alpha}}{dt}$ та $\mathcal{G}_\omega = \omega R = \frac{d\varphi}{dt} R = \frac{d\alpha_{\text{л}}}{dt} R$, де R – радіус повороту лотка (м), остаточне рівняння для визначення коефіцієнта заповнення k_3 має вигляд:

$$k_3 = \frac{\left(\frac{dl_{1\alpha}}{dt} + \frac{d\alpha_{\text{л}}}{dt} R \right)^2}{gb_{\text{л}}(\cos \alpha_{\text{л}} f_m - \sin \alpha_{\text{л}})}. \quad (2.57)$$

Визначення площі S'_p , яку займає розсерджене насіння після 2-го, 3-го... n -го обертання навколо осі вала 1 та нахилу лотка вниз на кут $\alpha'_l, \dots, \alpha'_n$, який відмінний від кута α_l аналогічний порядку визначення S_p з врахуванням кількості коливань n_l лотка. На теоретичному рівні без формалізації процесу цей вплив врахувати дуже складно за наявності цілого ряду об'єктивних і суб'єктивних обставин.

Прийнявши припущення, що зі збільшенням кількості коливань n_l лотка площа S'_p , яку займає розсерджене насіння після 2-го, 3-го... n -го обертання навколо осі вала 1 та нахилу лотка вниз на кут $\alpha'_l, \dots, \alpha'_n$ також збільшується в $n_l k_n$ рази, де k_n – введений коефіцієнт пропорційності, який визначає пропорційне збільшення площі S'_p відносно зміни кількості коливань n_l лотка можна записати, що значення коефіцієнта заповнення k_3 площі лотка можна визначати з врахуванням (2.57) за формулою:

$$k_3 = \frac{n_l k_n \left(\frac{dl_{1\alpha}}{dt} + \frac{d\alpha_l}{dt} R \right)^2}{gb_l (\cos \alpha_l f_m - \sin \alpha_l)} \quad (2.58)$$

Визначення дійсних числових значень коефіцієнта пропорційності k_n за різної кількості коливань n_l лотка необхідно встановлювати за результатами експериментальних досліджень.

Згідно з залежністю (2.58) побудовано графічну інтерпретацію зміни коефіцієнта заповнення k_3 площі лотка як функція $k_3 = f_k(\alpha_l; n_l)$ (рис. 2.13). Аналіз графічної залежності зміни коефіцієнта заповнення k_3 площі лотка показує, що теоретичне значення k_3 змінюється в межах від 0,1 до 1,27 за зміни кута нахилу лотка від 0,262 рад (15 град.) до 0,785 рад (45 град.) та кількості коливань лотка n_l рівній 1, 2, 3, 4 рази.

При цьому необхідно зазначити, що значення коефіцієнта заповнення k_3

площі лотка, які більше одиниці, тобто $k_z > 1$ є нетиповими, або недійсними, або нелогічними, тому що відношення S_p / S_l не може бути більшим за одиницю, тобто $S_p / S_l \leq 1$.

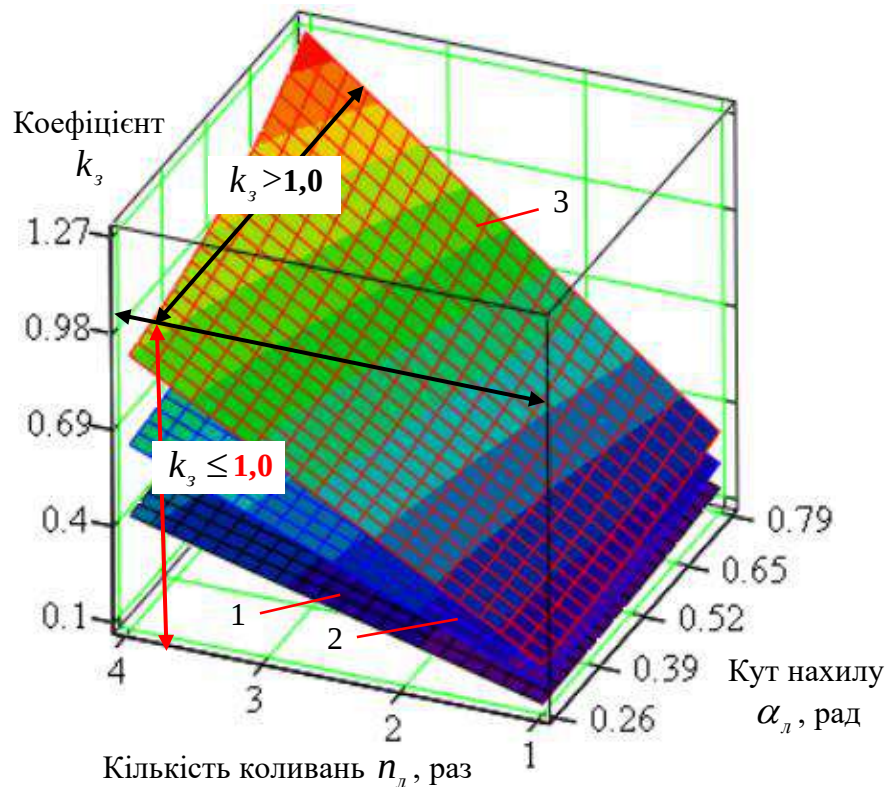


Рисунок 2.13 – Залежність зміни коефіцієнта заповнення k_z площі лотка як функція $k_z = f_k(\alpha_l; n_l)$: 1, 2, 3 – відповідно, $k_n = 0,4; 0,5; 0,6$

Таким чином, можна констатувати, що реальне теоретичне значення коефіцієнта заповнення k_z площі лотка посівним матеріалом буде змінюватися в межах $0,1 \leq k_z \leq 1,0$ залежно від зміни кута нахилу лотка відносно горизонтальної площини у межах $15 \leq \alpha_l \leq 30$ град. та кількості коливань лотка в межах $1 \leq n_l \leq 3$ рази, рис. 2.13.

За кількості коливань лотка $n = 3$ рази значення коефіцієнта заповнення k_z площі лотка знаходиться в межах від 0,24 до 0,66 за кута нахилу лотка $\alpha_l = 30$ град. і коефіцієнта пропорційності $k_n = 0,6$, крива 3 рис. 2.14б.

На рис. 2.14 наведено залежність теоретичної зміни коефіцієнта заповнення k_z площі лотка як функція: а – $k_z = f_k(\alpha_n)$; б – $k_z = f_k(n_n)$.

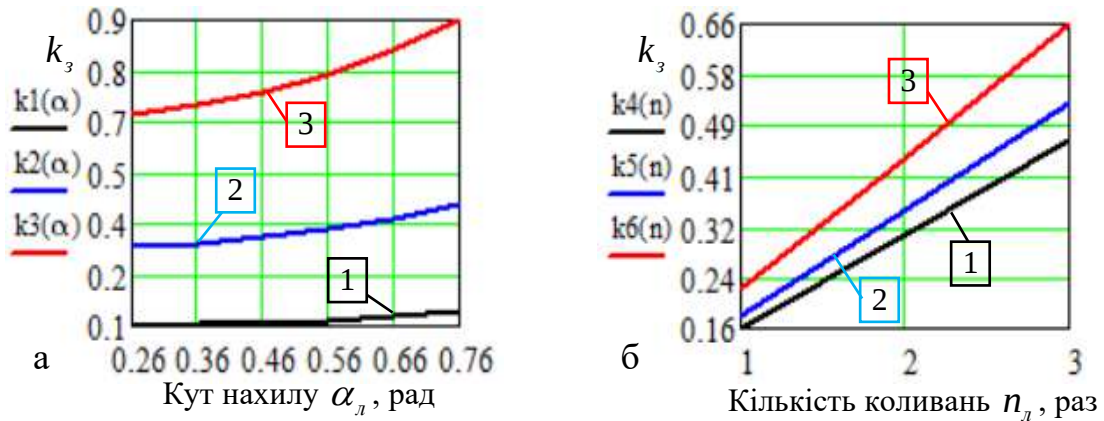


Рисунок 2.14 – Залежність зміни коефіцієнта заповнення k_z площі лотка як функція: а – $k_z = f_k(\alpha_n)$, 1, 2, 3 – відповідно, $n_n = 1, 2, 3$ рази, $k_n = 0,5$; б – $k_z = f_k(n_n)$, 1, 2, 3 відповідно, $k_n = 0,4; 0,5; 0,6$; $\alpha_n = 30$ град.

Також для теоретичних розрахунків коефіцієнта заповнення k_z площі лотка можна застосовувати такі формули:

$$k_z = \frac{n_n k_n (\mathcal{G}_{1a} + \omega_n R)^2}{g b_n (\cos \alpha_n f_m - \sin \alpha_n)}; \quad k_z = \frac{n_n k_n \left(\mathcal{G}_{1a} + \frac{\pi n_{\omega l} R}{30} \right)^2}{g b_n (\cos \alpha_n f_m - \sin \alpha_n)}, \quad (2.59)$$

де $n_{\omega l}$ – частота обертання лотка, об/хв.

2.4. Висновки до розділу

2.4.1. Розроблено математичну модель у вигляді системи рівнянь (2.7), яка описує процес живлення рослин мінеральним розчином і визначає динаміку процесів масообміну в субстраті з корінням рослини з урахуванням здатності випаровування листової частини рослини.

2.4.2. На основі створеної математичної моделі розроблені структурні схеми з контурами концентрації розчину та сонячного опромінення рослин, які можуть бути використані для розробки реальних систем автоматизації подачі

живильних речовин рослинам закритого ґрунту.

2.4.3. На основі дослідження технічної системи «сипуче середовище–лоток», отримано математичну модель, яка функціонально описує зміну коефіцієнта заповнення k_z насінням площі прямокутного лотка залежно від його кута нахилу та кількості коливань.

2.4.4. Встановлено, що реальне теоретичне значення коефіцієнта заповнення k_z площі лотка посівним матеріалом буде змінюватися в межах від 0,1 до 1,0 залежно від зміни кута нахилу лотка у межах від 15 до 30 град. та кількості коливань лотка в межах від 1 до 3 разів.

2.4.5. За кількості коливань лотка $n = 3$ рази значення коефіцієнта заповнення k_z площі лотка знаходиться в межах від 0,24 до 0,66 за кута нахилу лотка $\alpha_n = 30$ град. і коефіцієнта пропорційності $k_n = 0,6$.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [148, 149, 190, 191].

1. Солон О.В., Мельник О.С., Грищенко В.О. Моделювання системи мінерального живлення рослин в закритому ґрунті. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3(106). С. 72–77. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-10.

2. Солон О.В., Мельник О.С. Пристрій для вирощування гідропонної продукції. Патент України на корисну модель № 153587, Україна. МПК (2023.01) A01G 31/02 (2006.01) A01G 31/06 (2006.01) A01G 29/00. №а202101002; заявл. 01.03.2021 р.; опубл. 26.07.2023 р., Бюл. № 30.

3. Севостьянов І.В., Мельник О.С., Підлипна М.П. Дослідження параметрів ефективності процесів класифікації сухої зернової сировини при використанні різних схем її навантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3(102). С. 109–116. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-12.

4. Севостьянов І.В., Мельник О.С., Краєвський С.О., Горбаченко А.А. Дослідження відцентрового подрібнювача зернової сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 2(101). С. 13–26. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-2.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ

3.1. Програма та об'єкт експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження будь якого об'єкта моделювання, або технічної системи, якою є багаторівнева гідропонна установка, є предметом дослідження кількості її різноманітних станів.

Ці стани функціонально описують основні характеристики робочих елементів об'єкту дослідження.

Різнорізнаний випадково-можливий стан «чорної скрині» (об'єкта дослідження) функціонально регламентується та залежить від сукупності значень її вхідних параметрів і рівнів їх варіювання.

Реалізація станів системи визначає технічно-технологічні передумови або технічні регламенти проведення експериментальних досліджень технічного об'єкта.

При цьому отримані значення експериментального масиву даних відтворюють математичну модель об'єкта дослідження [157, 158].

Загальну структурну схему проведення експериментальних досліджень, як об'єкта моделювання технічної системи, наведено на рис. 3.1, яку побудовано за принципом кібернетичного поняття «чорної скрині» [159, 160].

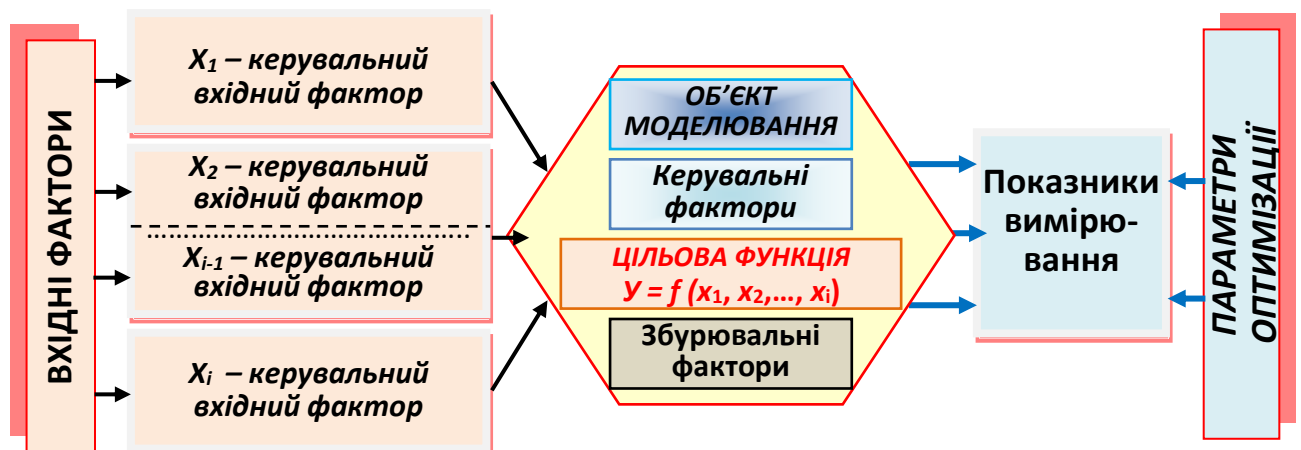


Рисунок 3.1 – Загальна структурна схема проведення експериментів

Для обґрунтування раціональних технологічних параметрів процесу функціонування багатоярусної гідропонної установки були сформульовані завдання та програма проведення експериментальних досліджень:

- розробити робототехнічну платформу з комплексом апаратно-програмного забезпечення «Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0», який призначений для дистанційного керування гідропонною установкою;
- розробити конструктивну схему та виготовити макетний зразок багатоярусної гідропонної установки та провести експериментальні дослідження процесу вирощування салату;
- виготовити конструкцію одноярусної гідропонної установки з обертовим лотком та провести експериментальні дослідження процесу розосередження насіння по вегетаційній поверхні при вирощуванні мікрозелені.

Структурна конструктивна схема багатоярусної гідропонної установки наведена на рис. 2.3, а загальний вигляд удосконаленої гідропонної установки – на рис. 3.2 [132].

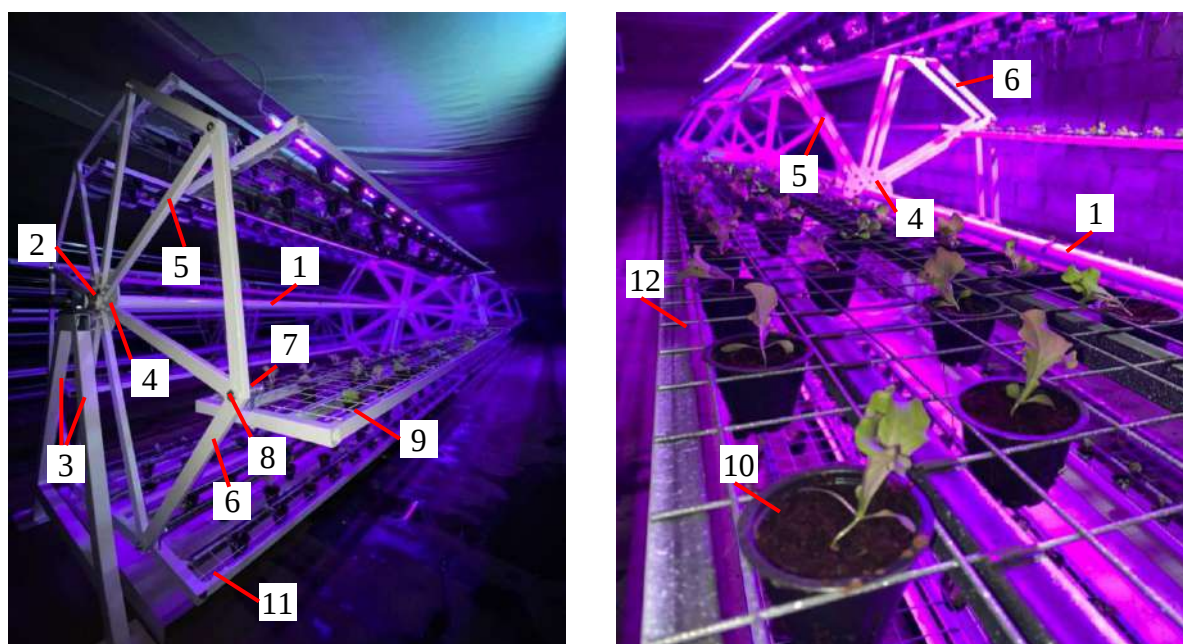


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд гідропонної установки

Пристрій для вирощування гідропонної продукції складається з валу 1 (рис. 3.2), що обертається в підшипниках 2, які встановлені на опорах 3. До валу 1 на певній відстані від підшипників встановлені фланці 4 із вісьмома стержнями 5, що рівномірно розташовані під однаковими кутами у

вертикальній площині.

Кінці стержнів 5 з'єднані між собою стяжками 6, які утворюють основи восьмигранної призми. На кінцях стержнів 5 розміщені підшипники 7, у яких встановлені осі 8. На осях 8 закріплено перфоровані лотки 9 з отворами для гідропонних стаканів 10.

Унизу пристрою, під лотками 9 до опор 3 прикріплена ємність 11 для гідропонного розчину з розчино-збірниками 12.

Пристрій для вирощування гідропонної продукції працює таким чином.

Перед запуском пристрою здійснюється закладання гідропонних стаканів 10 з посівним матеріалом в отвори перфорованих лотків 9 та заливається гідропонний розчин у ємність 11.

При обертанні вала 1 перфоровані лотки 9 з гідропонними стаканами рухаються поступально коловою траєкторією, проходячи послідовно повз джерела опромінення. При цьому корені гідропонних рослин, що знаходяться в гідропонних стаканах 10, встановлених в отворах перфорованих лотків 9, періодично занурюються у гідропонний розчин у ємності 11.

При подальшому русі лотків краплини гідропонного розчину, що стікають із коренів гідропонних рослин потрапляють на розчино-збірники 12 і їхньою похилою поверхнею стікають до ємності 11.

Залежно від виду вирощуваних рослин вибирається швидкість обертання валу 1 пристрою. Обертання може бути неперервним, або періодичним із зупинками, необхідними для живлення коренів рослин, які занурені у гідропонний розчин у ємності 11.

Після закінчення необхідного терміну вирощування на кожному перфорованому лотку 9 здійснюється заміна гідропонних стаканів 10 з рослинами. Пристрій має просту полегшену конструкцію. У ній також відсутні спеціальні пристрої для поливу вирощуваних рослин та досить складні схеми керування, які узгоджують їхню роботу з обертанням призми з лотками та рослинами на них.

З метою проведення експериментальних досліджень процесу вирощування мікрозелені в розробленій конструкції та обґрунтування

технологічних передумов до автоматичного керування процесом розосередження посівного матеріалу по площі вегетаційної поверхні розроблено лабораторний зразок одноярусної гідропонної установки з обертовим лотком. Така конструкція обґрунтована виходячи теоретичних досліджень, відповідно до яких, для перевірки отриманих теоретичним шляхом основних параметрів роботи основного вузла розробленої установки (лотка з посівним матеріалом) достатньо розглядати її одноярусну конструкцію.

На рис. 3.3 представлено конструктивну схему лабораторної установки з обертовим лотком, а загальний вигляд експериментальної установки з обертовим лотком.

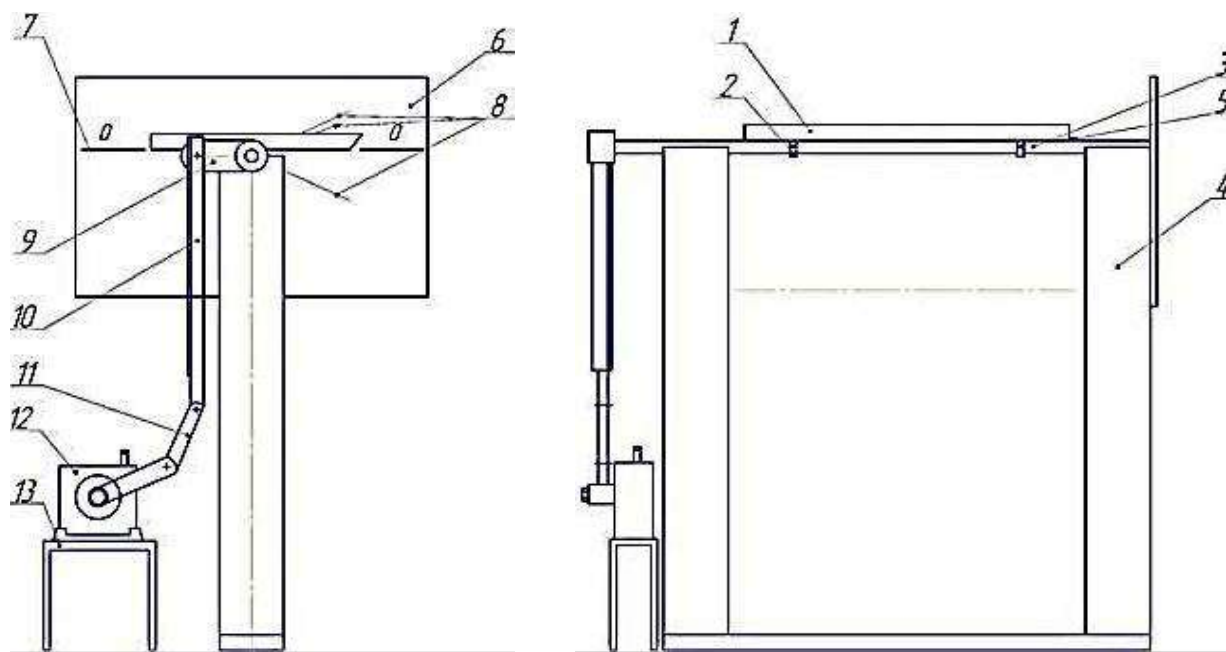


Рисунок 3.3 – Схема експериментальної одноярусної гідропонної установки з обертовим лотком

Експериментальна установка являє собою одноярусну конструкцію, встановлену на жорсткому каркасі з тягою та приводним механізмом.

Загальна будова експериментальної установки з обертовим лотком наступна.

Лоток 1 (рис. 3.3, 3.4) з розмірами 500×330 мм, що являє собою вегетаційну поверхню для проростання насіння, приєднаний сталевими хомутами 2 до 3 труби встановлюється на торці дерев'яних брусків 4, жорстко

прикріплених до підлоги.

Розміри торцевої поверхні брусків 100×100 мм, висота брусків 800 мм.

Один із бортів лотка (за його довжиною) відігнутий назовні на певний кут щодо перпендикуляра, проведеного на його дно.

Цей кут укосу обумовлений технологічною необхідністю, що забезпечує нормальний перебіг процесу вивантаження вирощеного врожаю гідропонної продукції.

У торцевій поверхні брусків були виготовлені пази, за розмірами труби 25×1 мм, де прикріплюється лоток.

Встановлення лотка з трубою в даний паз дозволяє відхиляти його на певні задані кути.

На картонну поверхню 6 наклеєний білий папір, на який була нанесена горизонтальна лінія 7, що збігається по висоті з дном лотка, при його горизонтальному положенні та очікувані кути 8 його відхилення відносно горизонтальної лінії.

Дана картонна поверхня поміщена на вертикальну стіну, до якої практично у щільну встановлені бруски з лотком.

З боку вільної від стіни на вихідний кінець труби кріпиться важіль 9, пластина якого приєднана до загальної тяги 10 (виготовляється з куточка 15×15 мм), яка своєю чергу через проміжну тягу 11 приєднана до вала редуктора 12, який встановлено на підставку 13 та який має поворотну ручку 14, рис. 3.3.

Для цього процесу використовувався черв'яковий самогальмуючий редуктор (РЧУ-50).

У бортах лотка 1 (рис. 3.3, 3.4) по ширині розташований штуцер 5 (рис. 3.3) для приєднання дренажного шланга.

3.2. Методологія проведення експериментальних досліджень багатоярусної гідропонної установки

Метою проведення експериментальних досліджень багатоярусної

гідропонної установки (рис. 3.1) є вивчення процесу розвитку рослин гідропонного салату в теплиці залежно від параметрів освітлення.

Об'єктом дослідження є експериментальний зразок багатоярусної гідропонної установки.

Предметом дослідження – параметри освітлення та їх взаємозв'язок впливу на показники росту рослин гідропонного салату в теплиці.

Для обґрунтування основних параметрів і режимів роботи багатоярусної гідропонної установки провели експериментальні дослідження з визначення характеру зміни показників росту рослин салату гідропонним способом.

При цьому визначали функціональний характер зміни площі листової поверхні рослини, яку позначили індексом $S_{лс}$ (см²) та маси листя $M_{лс}$ (г) залежно від встановлених факторів.

Методика проведення досліджень була наступною.

Дослідження проводили на гідропонних модулях, які розділені світлонепроникними екранами, які не дозволяють проникати світлу в сусідні секції, але забезпечують циркуляцію повітряних потоків, в лабораторному приміщенні без природного освітлення.

У секціях підтримувались температура повітря 18-20°, відносна вологість повітря 60-70%, вміст CO₂ не менше 0,03%, швидкість повітря 0,3-0,5 м/с. Мінеральне живлення рослин здійснювали гідропонічними розчинами, їх склад на протязі досліду залишався постійним.

Мінеральне живлення рослин здійснювали гідропонічними розчинами загального використання.

Вимір складу елементів живлення та їх коригування здійснювали вручну для кожного досліду.

В якості екстракту застосовувався розчин агроперліту.

В якості вхідних факторів було використано – час опромінення (фотоперіод) на трьох рівнях: $T_o = 8; 16; 24$ години на добу, а також величина опромінення $E_o = 10; 20; 30$ Вт/м², тобто реалізовано двофакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами ПФЕ 3² [132].

Структурна схема або модель проведення експериментальних досліджень функціонального характеру зміни площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ (см²) та маси листа $M_{лс}$ (г) під час вирощування салату залежно від встановлених факторів наведена на рис. 3.4 [160].

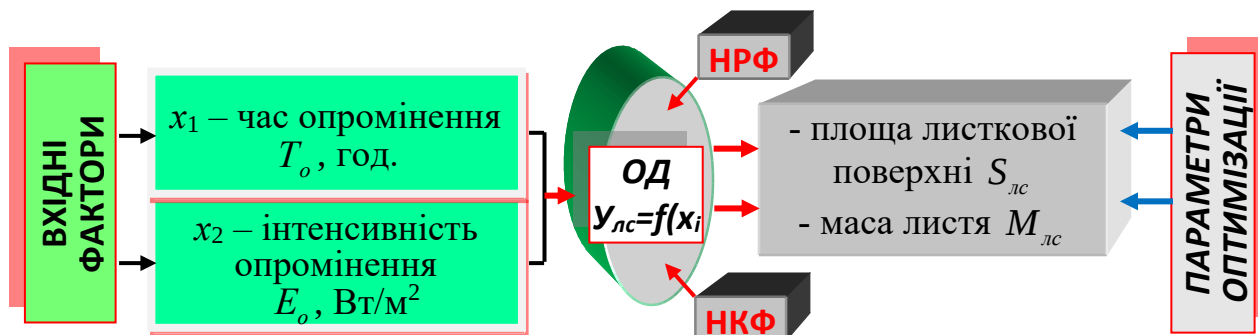


Рисунок 3.4 – Модель реалізації експериментів із визначення площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листа $M_{лс}$

Рівні варіювання факторами наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Фактори та рівні варіювання факторами ПФЕ 2³

Назва фактора	Натуральне позначення	Кодоване позначення / Рівні варіювання		
		Нижній	Нульовий	Верхній
Час опромінення, год.	T_o	-1/8	0/16	+1/24
Інтенсивність опромінення, Вт/м ²	E_o	-1/10	0/20	+1/30

В якості джерел опромінення були використані експериментальні світлодіодні випромінювачі. Потрібний спектр випромінювання задавався пропорцією між синім, зеленим та червоним світлодіодами, а також величиною струму через світлодіоди.

Спектральний склад всіх випромінювачів був однаковий, а співвідношення енергії в окремих спектральних діапазонах $k_{син} = 30\%$, $k_{зел} = 20\%$, $k_{чер} = 50\%$. Середнє квадратичне відхилення частки енергії в окремих спектральних діапазонах від середнього складало не більше 2,5%.

Величину опромінення рослин впродовж всього вегетаційного періоду підтримували на одному рівні шляхом зміни висоти підвіски засобів опромінення.

Окрім проведення основних експериментів типу ПФЕ 3² згідно з

розробленою план-матрицею (Додаток Б) додатково провели проміжні експерименти, які включали в себе проведення двох додаткових серій дослідів в проміжних точках різних комбінацій вхідних факторів за таких значень: час опромінення $T_o = 12$ год., $T_o = 22$ год.; інтенсивність опромінення $E_o = 15$ Вт/м², $E_o = 25$ Вт/м² [161].

Основним завданням таких досліджень було встановлення функціонального характеру розвитку рослин салату від зміни дози опромінення, яку позначили індексом H_o , при цьому $H_o = T_o E_o$, Вт год./м².

Розраховані параметри дози опромінення рослин при проведенні експериментів типу ПФЕ 3² та додаткових експериментів наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розраховані дози опромінення H_o , Вт год./м²

Параметри		Інтенсивність опромінення E_o , Вт/м ²				
		10	15	20	25	30
Час опромінення T_o , год.	8	80	120	160	200	240
	12	120	180	240	300	360
	16	160	240	320	400	480
	20	200	300	400	500	600
	24	240	360	480	600	720

Для об'єктивної оцінки впливу опромінення на розвиток рослин використовували модель, яка враховує динаміку зміни площі кожного листа рослини та його маси [160]. Листки з рослин одного віку розділяли на групи, у відповідності з їх номером N , у порядку появи на стеблі. Фіксувались кількість листя на рослині $z_{лс}$, їх геометричні розміри (довжину вздовж черешка A_n і найбільшу ширину B_n), сиру масу $M_{лс}$. Параметри розвитку рослини салату зручно визначати за площею його листка.

Попередні дослідження показують що площу листка салату можна визначити за формулою [160]:

$$S_{лс} = 0,61 A_n B_n. \quad (3.1)$$

Оброблення, за результатами проведених досліджень, отриманого експериментального масиву даних площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ провели за загальновідомою методикою статистичного оброблення та аналізу отриманих статистичних даних [162, 163] (Додаток В).

У кінцевому результаті після оброблення експериментальних даних отримували емпіричні рівняння регресії, які характеризували функціональну залежність зміни площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ від зміни вхідних факторів [164, 165].

Функцію відгуку зміни площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату залежно від вхідних факторів визначали за найбільшим значенням коефіцієнта чисельної детермінації D .

Згідно результатів проведених розрахунків з застосуванням пакетів прикладної програми статистичного оброблення для персонального комп'ютера та аналізу отриманих статистичних результатів, будували поверхні відгуку та їх двомірні перерізи для графічного зображення результатів функціональної зміни площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ залежно від вхідних факторів.

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу розподілення посівного матеріалу в лотку

Для обґрунтування основних параметрів і режимів роботи експериментальної установки провели експериментальні дослідження з визначення характеру зміни коефіцієнта повноти заповнення поверхні лотка 1 (рис. 3.3) посівним матеріалом залежно від встановлених факторів (у подальшому – коефіцієнт заповнення), який позначили індексом $k_{зе}$, %.

Методика проведення досліджень була наступною.

Дослідження проводили з сочевицею з початковою схожістю насіння, що становить 91% відповідно до ДСТУ 2240-93.

У процесі досліджень використовувалось насіння сочевиці вологістю 10%, 14% та 18%, тобто сухе, вологе та сире. Вологість насіння сочевиці перевірялася прискореним методом на приладі Чижової [166].

Експеримент проводився у лабораторних умовах, при фіксованій вологості навколишнього середовища (85–88%). Вологість у приміщенні лабораторії контролювалася цифровим термогігрометром AR837 кожні 30 хв протягом усього експерименту.

Необхідну порцію насіння сочевиці висипали вручну «купкою» на поверхню лотка 1 (рис. 3.3) лабораторної установки біля прямокутного борту. Відповідно до прийнятих норм посіву (5 кг зерна на 1 м² вегетаційної поверхні), на лоток експериментальної установки площею 0,165 м² містилося 910 г зерна, площа наважки якого приблизно дорівнювала 0,085 м². Маса навішування зерна для посіву визначалася шляхом зважування на технічних терезах з трикратною повторністю та точністю до 1 г.

Змінними вхідними факторами під час проведення експериментальних досліджень приймали:

- вологість зерна (посівного матеріалу) w_3 , яку кодували індексом $w_3 \rightarrow x_1$, %;
- кут відхилення α_l лотка 1 (рис. 3.2) відносно горизонтальної лінії 7, який кодували індексом $\alpha_l \rightarrow x_2$, град.;
- кількість коливань лотка n_l , яку кодували індексом $w_3 \rightarrow x_3$, разів.

Рівні варіювання вхідними факторами представлено в табл. 3.3.

Структурну схему проведення експериментальних досліджень одноступенчастої гідропонної установки, як об'єкта моделювання технічної системи, яку побудовано за принципом кібернетичного поняття «чорної скрині» наведено на рис. 3.5 [165].

Згідно з положеннями [167] складали план-матрицю послідовності проведення кожного наступного експерименту.

Таким чином, реалізували планований трифакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами з загальною кількістю однієї повторності

експерименту, яка дорівнює 27 [168].

Кількість повторності одного нумерованого експериментального дослідження дорівнювала 3.

Таблиця 3.3 – Назва вхідних факторів і рівні варіювання вхідними факторами

Фактори	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-)	Нульовий (0)	Верхній (+)
Вологість зерна w_z , %	4	10	14	18
Кут відхилення лотка α_n , град.	10	10	20	30
Кількість коливань лотка n_n , раз	2	1	3	5

При цьому для зменшення сумарної загальної кількості експериментів $\sum_{i=1}^3 N_z = P^k \cdot \Pi_i$, де P – кількість рівнів варіювання; k – кількість вхідних факторів; Π_i – кількість повторності одного експерименту ($\sum_{i=1}^3 N_z = 3^3 \cdot 3 = 81$) застосували несиметричну план-матрицю Бокса-Бенкіна з загальною кількістю дослідів однієї повторності, яка дорівнює 15.

Для зменшення впливу неконтрольованих і нерегульованих зовнішніх й внутрішніх впливів (факторів) на значення вихідного параметра оптимізації провели рандомізацію несиметричної план-матриці Бокса-Бенкіна методом випадкового балансу, який було реалізовано за методом випадкових чисел згідно з положенням [169].

Рандомізовану несиметричну план-матрицю Бокса-Бенкіна наведено у додатку Г.

Обертаючи ручку 15 редуктора 12 (рис. 3.3) за допомогою важеля 9 та тяг 10, 11 відхиляли лоток 1 на необхідний заданий кут відхилення α_n (або α_n), який було проградуйовано та нанесено на білому папері, що був приклеєний на картонну поверхню 6.

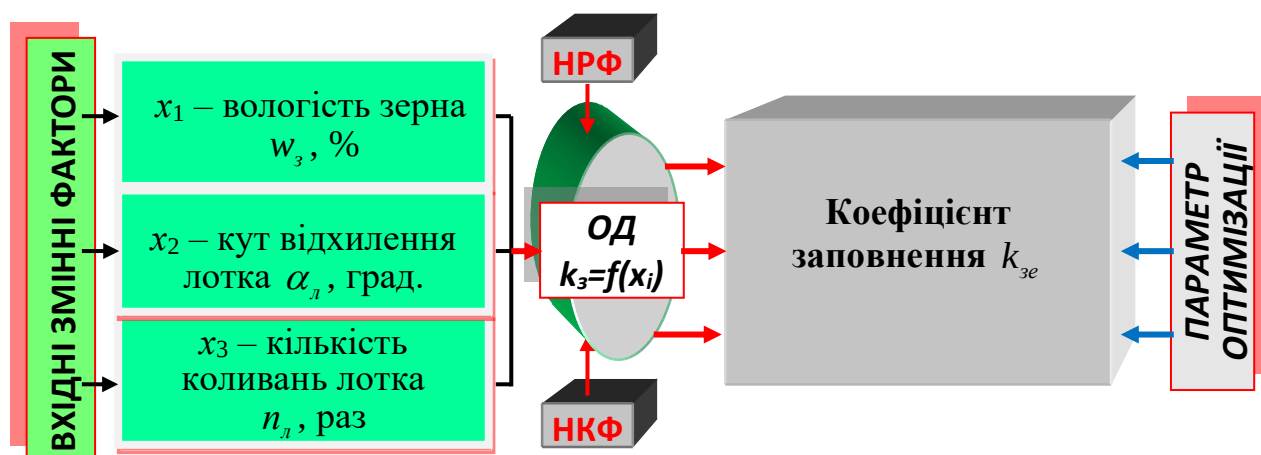


Рисунок 3.5 – Структурна схема проведення експериментальних досліджень одноярусної гідропонної установки

Після чого лотку задавали встановлену кількість його коливань послідовно переводячи поверхню лотка від горизонтального положення до рівня встановленого кута його відхилення.

При цьому завантажений посівний матеріал відповідної вологості переміщувався по поверхні лотка та в подальшому розшаровувався по площі поверхні лотка.

Після закінчення експерименту проводилися необхідні виміри, а саме координати шару насіння, що розшаровувався по поверхні лотка (рис. 3.6).

Для цього на внутрішню поверхню лотка 1 (рис. 3.6) та бортів були нанесені шкали (вісь ординат від (-5) до (+5), а вісь абсцис – від 0 до 10.

Коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням визначали за формулою:

$$k_{ze} = S_z / S_l, \quad (3.2)$$

де S_z – площа лотка заповнена насінням після проведення експерименту, m^2 ;

S_l – загальна площа лотка, m^2 .

Площу лотка заповнену насінням S_{iz} після проведення експерименту визначали наступним чином.

1. Визначали площу лотка $S_{\text{вл}}$ (м^2), яка не заповнена насінням, або є вільною від насіння за формулою:

$$S_{\text{вл}} = S_1 z_{\text{в}}, \quad (3.3)$$

де S_1 – одинична площа осередку площі лотка, м^2 ;

$z_{\text{в}}$ – кількість осередників одиничної площі лотка не заповнених насінням, шт.

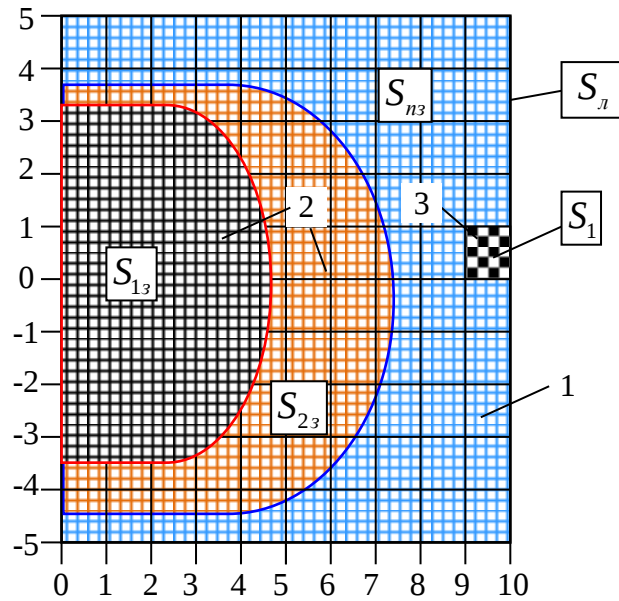


Рисунок 3.6 – Схема для визначення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням: 1 – лоток; 2 – насіння сочевиці; 3 – осередок одиничної площі

Тоді згідно з (3.2) і (3.3) кінцева формула для визначення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням буде:

$$k_{ze} = \frac{(S_l - S_{i3})}{S_l} = \frac{(S_l - S_1 z_{\text{в}})}{S_l} = 1 - \frac{S_1 z_{\text{в}}}{S_l}. \quad (3.4)$$

Оброблення, за результатами проведених досліджень, отриманого експериментального масиву даних коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням сочевиці провели за загальновідомою методикою статистичного оброблення та аналізу отриманих статистичних даних [170] (Додаток В).

У кінцевому результаті після оброблення експериментальних даних отримували емпіричні рівняння регресії, які характеризували функціональну

залежність зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням сочевиці від зміни вхідних факторів [171, 172].

Функцію відгуку зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням сочевиці залежно від вхідних факторів визначали за найбільшим значенням коефіцієнта чисельної детермінації D .

Згідно результатів проведених розрахунків з застосуванням пакетів прикладної програми статистичного оброблення для персонального комп'ютера та аналізу отриманих статистичних результатів, будували поверхні відгуку та їх двомірні перерізи для графічного зображення результатів функціональної зміни коефіцієнта заповнення k_z площі поверхні лотка насінням сочевиці залежно від вхідних факторів.

3.4. Висновки до розділу

3.4.1. Спроековано та виготовлено експериментальний зразок багаторусної гідропонної установки та лабораторний стенд для проведення досліджень функціональних процесів вирощування мікрозелені.

3.4.2. Розроблено часткові методики для визначення функціональної зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} площі поверхні лотка насінням сочевиці, площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ салату залежно від зміни вхідних факторів.

3.4.3. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень функціональної зміни коефіцієнта заповнення k_z площі поверхні лотка насінням сочевиці, площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ салату будуть обґрунтовані раціональні параметри та режими роботи багаторусної гідропонної установки.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБЛЕНОЇ ГІДРОПОННОЇ УСТАНОВКИ

4.1. Розробка робототехнічної платформи з комплексом апаратно-програмного забезпечення

Сучасні тенденції автоматизації виробничих процесів характеризуються широкомасштабним переходом на локальні та гнучкі переналагоджувальні системи із використанням технологій бездротової передачі даних, що базуються на використанні датчиків та мікроконтролерів, зокрема, сімейства Arduino [173, 174], Raspberry-Pi [175, 176] тощо.

Для збільшення ефективності виробничих процесів агропромислового комплексу, в багатьох господарствах використовують комплексну систему сільськогосподарського менеджменту, яка в свою чергу, базується на використанні високотехнологічних систем контролю, моніторингу, керування та автоматизації виробничих процесів.

Ключовим компонентом цього підходу є використання широкого спектру технологій, таких як системи глобального позиціонування (GPS), системи управління, сенсорні системи контролю та моніторингу, робототехнічні системи, безпілотні літальні апарати, високоінтегровані смарт-системи, системи штучного інтелекту.

Підґрунтям для функціонування перелічених інструментів є спеціалізоване програмне та апаратне забезпечення [177–188].

Впровадження перелічених систем і технологій сприяє вирішенню цілого комплексу завдань, які умовно можна поділити на:

- технологічні, скорочення часу, що витрачається на сільськогосподарські операції (планування робіт з використанням комп'ютерних технологій, моніторинг, контроль та ін.);

- технічні, спрямовані на створення нових машин (безпілотні транспортні засоби);
- агрохімічні, що сприяють оптимізації внесення добрив, насіння та ін.;
- екологічні, націлені на зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище (точна оцінка потреби сільськогосподарської культури в азотних добривах та ін.).

Враховуючи важливість технологічного оновлення АПК України, нами створено робототехнічну платформу багатоцільового призначення та розроблено комплекс апаратно-програмного забезпечення «Smart IR-Control Robotic Chassis v_1.0» (Додаток Д.1), який призначений для дистанційного керування нею. Майнові права на запропоновані технологічні та програмні рішення захищено Свідоцтвом про державну реєстрацію авторського права № 103284 (Додаток Д.2) [189].

В основі технічного рішення закладено принцип збільшення вепольності системи за рахунок видокремлення частини функцій блока адаптивного керування, а саме прийому, структуризації та первинної обробки вхідної інформації отриманої в результаті моніторингу та покладення їх виконання на апаратну частину, що змонтована на мобільному шасі. Крім того на роботизованій платформі змонтовано датчики для одержання інформації про параметри навколишнього середовища теплиці та коригування параметрів мікроклімату.

Таким чином, використання запропонованої системи управління теплицею дозволяє виконувати моніторинг та автоматизоване коригування параметрів до заздалегіть визначених рівнів.

Апаратна частина робототехнічної платформи побудована на базі плати мікроконтролерів з відкритим кодом Arduino UNO. Для управління серводвигунами застосовується передача інформації у вигляді IR-сигналів, які генеруються IR-передавачем смартфона. Формування IR-імпульсів відбувається при виконанні протоколів Віртуального IR-пульта, розробленого авторами в мобільному додатку IR REMOTE CREATOR [4,5].

Алгоритми програми складено відповідно до вимог та побудовані із застосуванням відомих методів механіко-математичного моделювання та числового розв'язку задач з використанням ЕОМ.

Програмування та налаштування головного контролера роботизованого шасі відбувається в інтегрованому середовищі розробки Arduino IDE на мові програмування Arduino (базується на об'єктно-орієнтованій мові C++ із доповненням деяких спеціалізованих бібліотек).

Завантаження програми керування апаратними компонентами в пам'ять контролера Arduino Uno R3 ATmega328. Програмування та налаштування головного контролера роботизованого шасі відбувається в інтегрованому середовищі розробки Arduino IDE.

Вихідний код для середовища випущений під загальнодоступною ліцензією GNU версії 2 та підтримує мови C і C++ з використанням спеціальних правил структурування коду.

Актуальну версію Arduino IDE можна скачати на офіційному сайті за посиланням <https://www.arduino.cc/en/Main/OldSoftwareReleases#previous>.

Послідовність завантаження програми керування апаратними компонентами в пам'ять контролера Arduino Uno R3 ATmega328 є наступною.

1. Після установки програми та запуску Arduino IDE підключіть плату контролера Arduino UNO до комп'ютера (рис. 4.1). Система завантажить драйвери і призначить платі ім'я послідовного порту, через який буде відбуватися взаємодія з програмою.

2. Відкрити файл із вихідним кодом програми «Robot_Smart_IR_1_0.ino», що розміщується в директорії: «Robot Smart IR_1_0\Robot_Smart_IR_1_0\Robot_Smart_IR_1_0.ino» (рис. 4.2).

3. Завантажити програму керування в пам'ять мікроконтролера Arduino UNO. Для цього на панелі інструментів потрібно виконати дію «Loading» (рис. 4.3) та дочекатися повідомлення про успішне завантаження.

4. Від'єднати плату контролера Arduino UNO від комп'ютера.

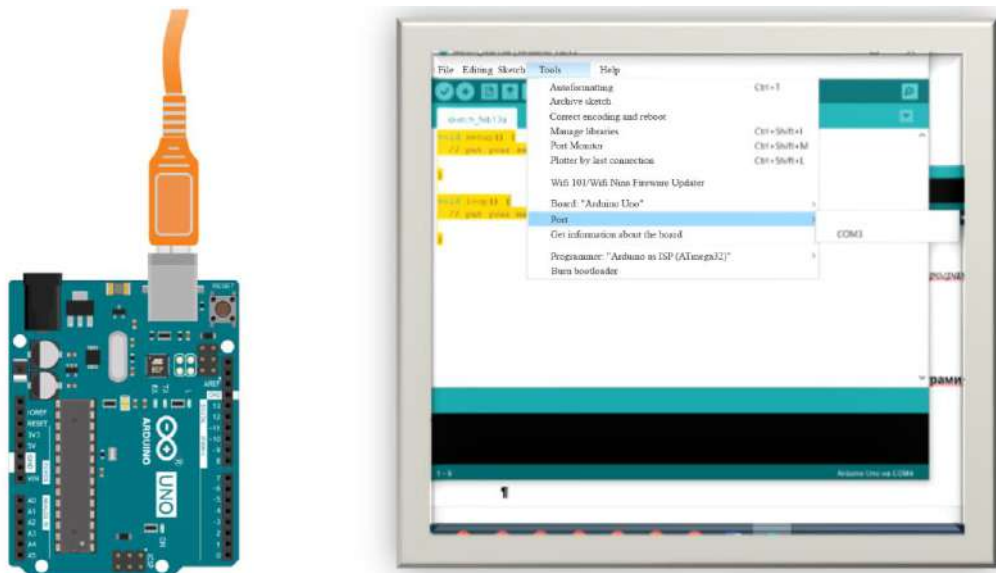


Рисунок 4.1 – Підключення Arduino UNO R3 до персонального комп'ютера та запуск програми Arduino IDE

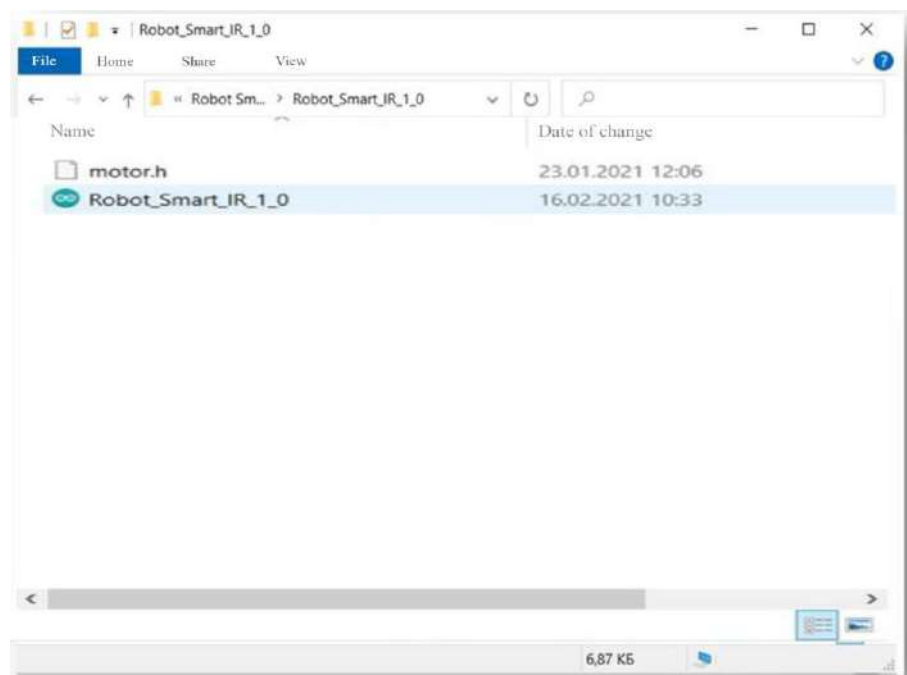


Рисунок 4.2 – Файли програми керування апаратними компонентами роботехнічної платформи: «Robot_Smart_IR_1_0.ino» – файл із кодом основної програми керування; «motor.h» – файл із наборами функцій для управління режимами руху мотор-редукторів

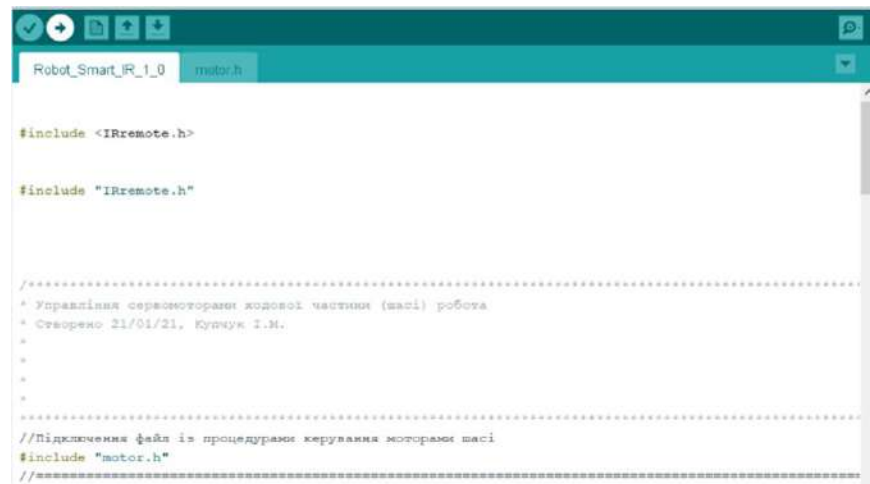


Рисунок 4.3 – Завантаження вихідного коду в пам'ять мікроконтролера Arduino UNO

Завантаження віртуального пульта керування на смартфон.

1. Для завантаження інтерфейсу та відображення віртуального пульта на екрані смартфона потрібно завантажити текстовий файл із описом структури та параметрів віртуального пульта «Remote_1_0» в каталог «keuwlsoft/ir-remotes/» пристрою зберігання даних смартфона (рис. 4.4).

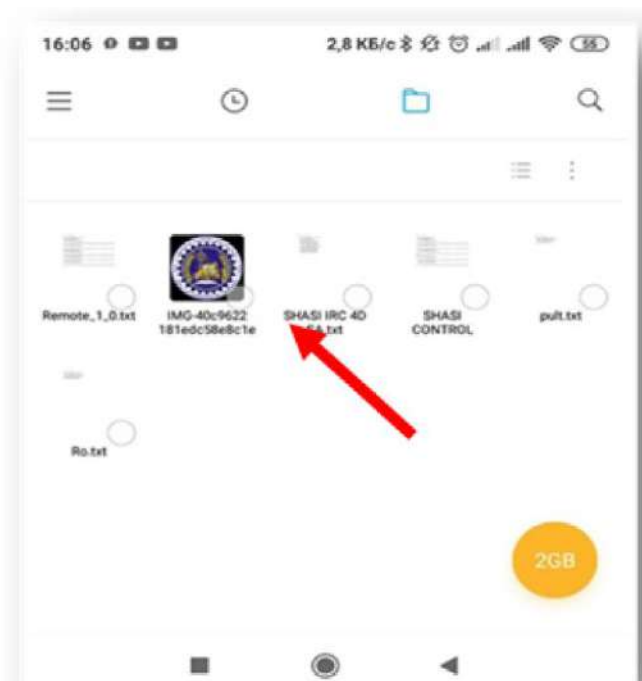


Рисунок 4.4 – Завантаження текстового файлу «Remote_1_0» в каталог «keuwlsoft/ir-remotes/» на смартфоні

2. Запустити мобільний додаток IR Remote Creator та обрати команду

головного меню позначену піктограмою у вигляді дискети та обрати варіант «Load Remote (s)» (рис. 4.5).

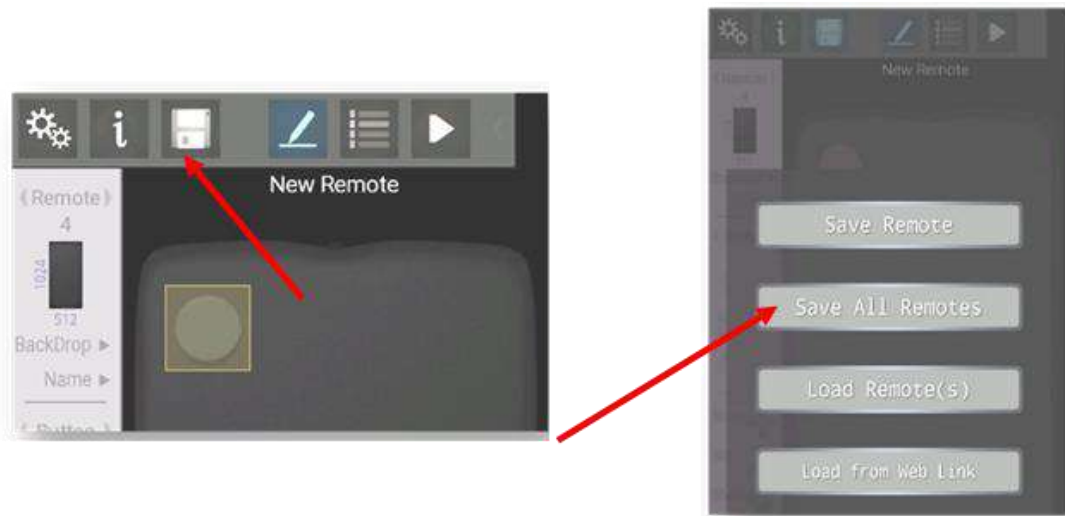


Рисунок 4.5 – Запуск мобільного додатку IR Remote Creator

3. В списку доступних варіантів оберіть раніше завантажений файл «Remote_1_0.txt» та виконайте команду «Load».

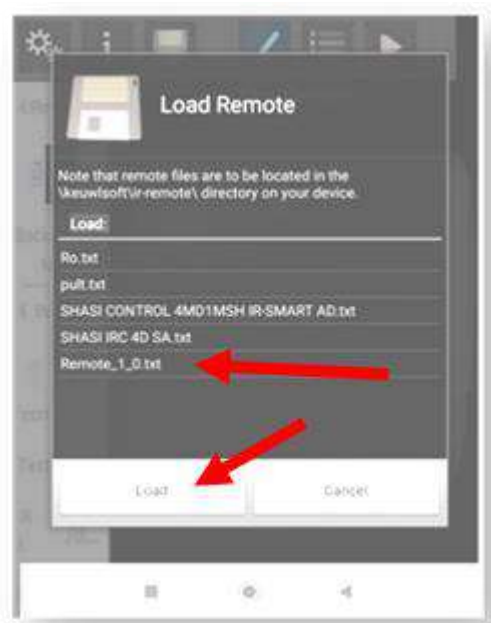


Рисунок 4.6 – Виконання команди «Load»

4. Після виконання завантаження на екрані смартфона з'явиться інтерфейс віртуального пульта дистанційного управління роботехнічною платформою повністю готовий до використання (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд пульта управління; команди: «GO» – рух вперед; «BACK» – рух назад; «L», «R» – поворот ліворуч і праворуч відповідно; «STOP» – повна зупинка моторів

4.2. Результати експериментальних досліджень багоярусної гідропонної установки

Згідно з методикою проведення експериментальних досліджень, яку викладено в пп. 3.2 розділу 3 дисертаційної роботи, після проведення експериментів багоярусної гідропонної установки (рис. 4.8), отримано експериментальний масив даних зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату залежно від зміни вхідних факторів: час опромінення T_o , год.; інтенсивність опромінення E_o , Вт/м².

Експериментальний масив даних наведено в додатку Е.1

За результатами статистичних розрахунків шляхом послідовного перебору відомих алгебраїчних функцій було встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D_S = 0,989$ (Додаток Е.2) та $D_M = 0,976$ (Додаток Е.3), який є значимим з вірогідністю $P = 0,99$, відповідає

апроксимуючий математичні моделі повного квадратного полінома другої степені, або

$$S_{kc}(M_{kc}) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (4.1)$$

де S_{lc} , M_{lc} – експериментальне значення площі листової поверхні рослин салату, см^2 ;

M_{lc} – експериментальне значення маси листя рослин салату, г ;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії відповідних значень вхідних факторів x_i ;

x_1, x_2 – вхідні натуральні фактори.



Рисунок 4.8 – Експериментальні дослідження процесу вирощування листя салату з використанням багаторярусної гідропонної установки

Отримані за результатами статистичних розрахунків експериментальних даних площі листової поверхні S_{lc} (Додаток Е.2) та маси листя M_{lc} рослин салату (Додаток Е.3) згідно з залежностями (В.4) та (В.5) додатка В значення коефіцієнтів рівняння регресії $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ при відповідних натуральних факторах і їх взаємодії, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Натуральні значення коефіцієнтів b_i рівняння регресії площі листової поверхні $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату

Позначення	Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії			
$S_{лс} = f_S(T_o; E_o)$	b_0	b_1	b_2	b_{12}
	-818,1	60,1	70,0	0,003
	b_{11}		b_{22}	
	-1,2		-1,3	
$M_{лс} = f_M(T_o; E_o)$	b_0	b_1	b_2	b_{12}
	-4,78	0,19	0,83	$-3,82 \cdot 10^{-17}$
	b_{11}		b_{22}	
	0,0026		0,0033	

У процесі проведення статистичної перевірки значимості коефіцієнтів $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ рівняння регресії за t -критерієм Ст'юдента було встановлено, що коефіцієнт $b_{12} = -3,82 \cdot 10^{-17}$ емпіричної моделі $M_{лс} = f_M(T_o; E_o)$ є незначущим, тобто ним можна знехтувати.

Згідно з аналізом значимості коефіцієнтів $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ рівняння регресії емпіричної моделі $S_{лс} = f_S(T_o; E_o)$ і $M_{лс} = f_M(T_o; E_o)$ та після перевірки адекватності рівнянь за F -критерієм Стюдента, отримано математичну модель, яка характеризує функціональну зміну параметра оптимізації залежно від зміни вхідних факторів у межах (за вірогідності 0,95) – часу опромінення $8 \leq T_o \leq 24$ (год.) і інтенсивності опромінення $10 \leq E_o \leq 30$ (Вт/м²) [132]:

- площі листової поверхні $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату

$$S_{лс} = -818,1 + 60,1T_o + 70,0E_o + 0,003T_oE_o - 1,2T_o^2 - 1,3E_o^2; \quad (4.2)$$

- маси листя $M_{лс}$ рослин салату

$$M_{лс} = -4,78 + 0,19T_o + 0,83E_o + 0,0026T_o^2 - 0,0033E_o^2. \quad (4.3)$$

Згідно з моделлю (4.2), (4.3) побудовано графічну інтерпретацію функціональної зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ (рис. 4.9) та маси листя $M_{лс}$ (рис. 4.10) рослин салату у вигляді поверхні відгуку та її двомірного перерізу, як функції: $S_{лс} = f_S(T_o; E_o)$; $M_{лс} = f_M(T_o; E_o)$.

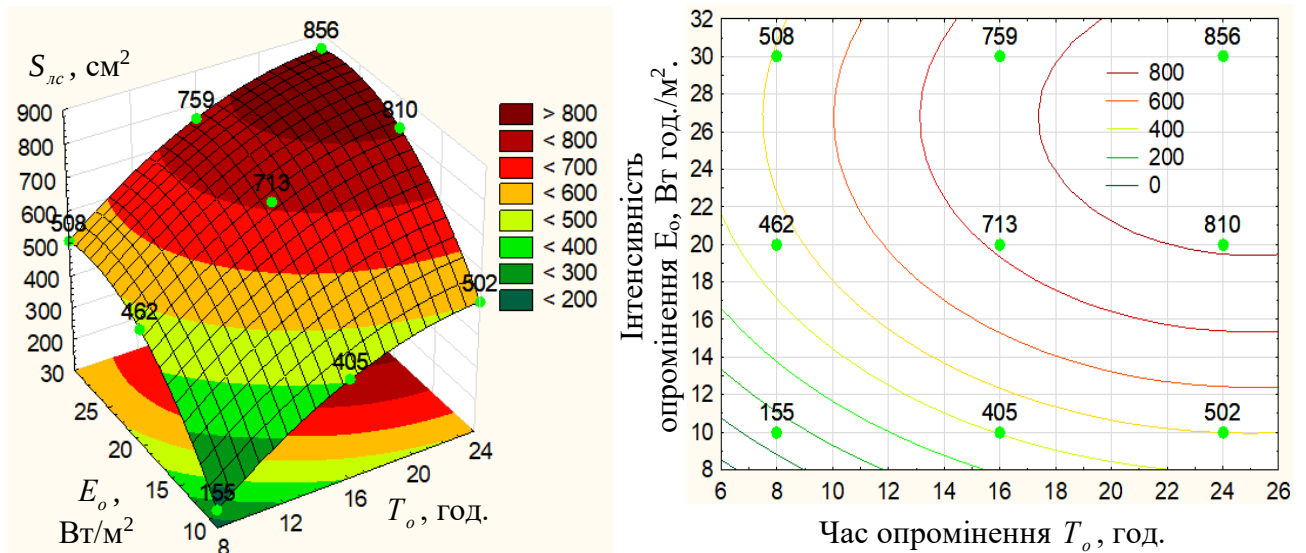


Рисунок 4.9– Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату як функція $S_{лс} = f_S(T_o; E_o)$

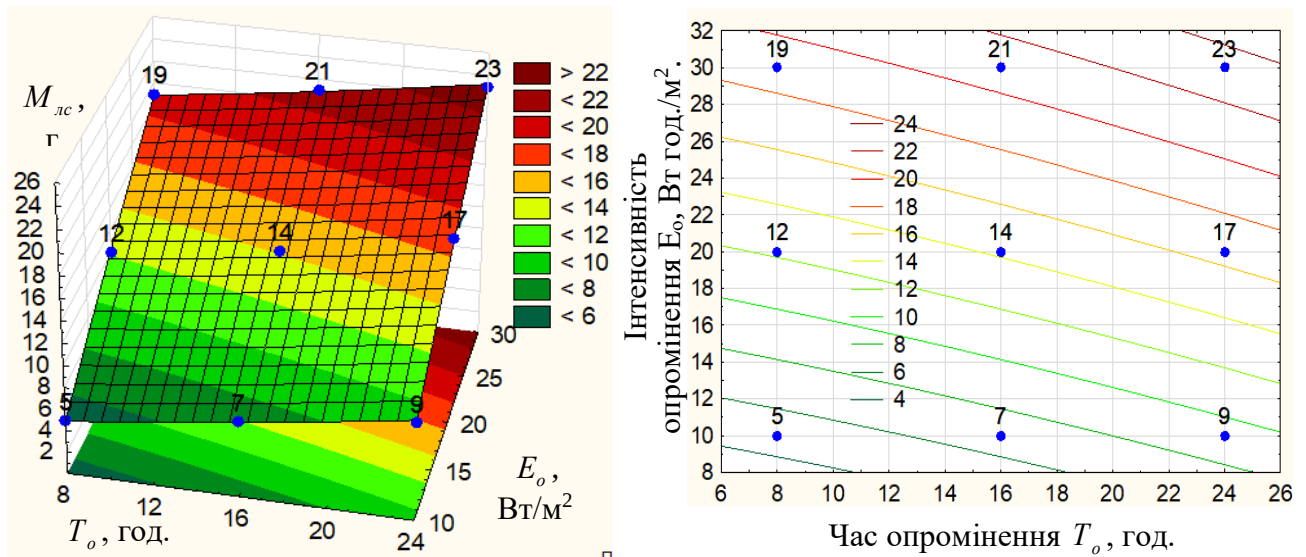


Рисунок 4.10 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни маси листя $M_{лс}$ рослин салату як функція $M_{лс} = f_M(T_o; E_o)$

На основі проведеного аналізу графічних побудов (рис. 4.9, 4.10) встановлено, що значення параметрів оптимізації, які отримано в результаті апроксимації експериментального масиву даних (додаток Е.1) та розраховані за моделлю (4.2), (4.3) змінюються в межах;

- площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату від 155 до 856 см², при цьому вірогідність розсіювання апроксимованих значень $S_{лс}$ підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95, що характерно та підтверджується графічним побудовам, які наведено на рис. 4.11;

- маса листя $M_{\text{лс}}$ рослин салату від 5 до 23 г, при цьому вірогідність розсіювання апроксимованих значень $S_{\text{лс}}$ підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95, що характерно та підтверджується графічним побудовам, які наведено на рис. 4.12.

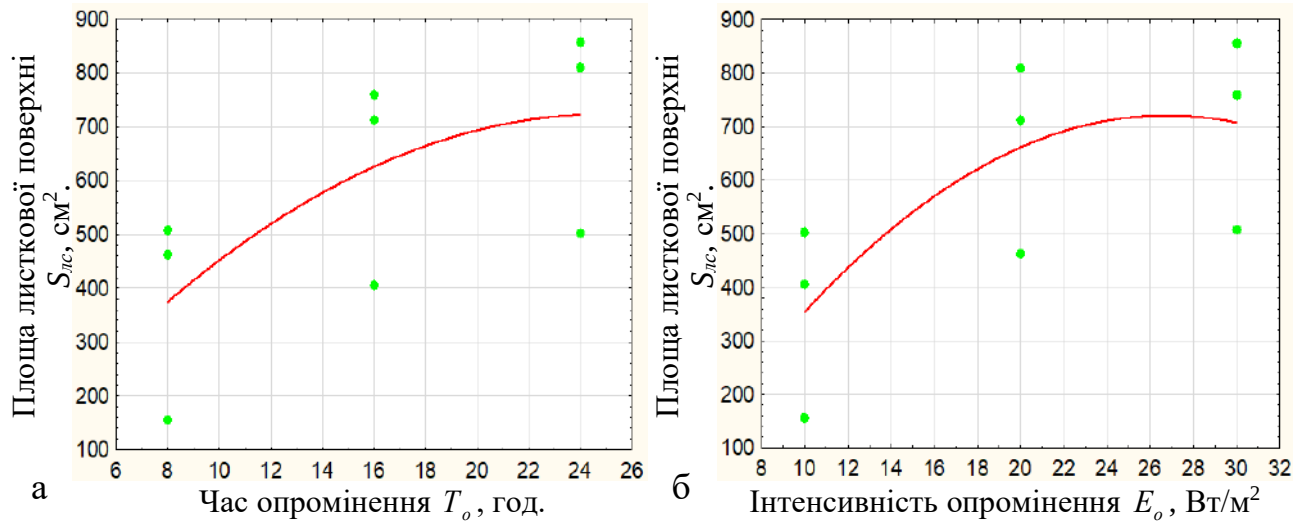


Рисунок 4.11 – Діаграма розсіювання експериментальних даних залежності зміни площі листової поверхні $S_{\text{лс}}$ рослин салату як функція:

а – $S_{\text{лс}} = f_S(T_o)$; б – $S_{\text{лс}} = f_S(E_o)$

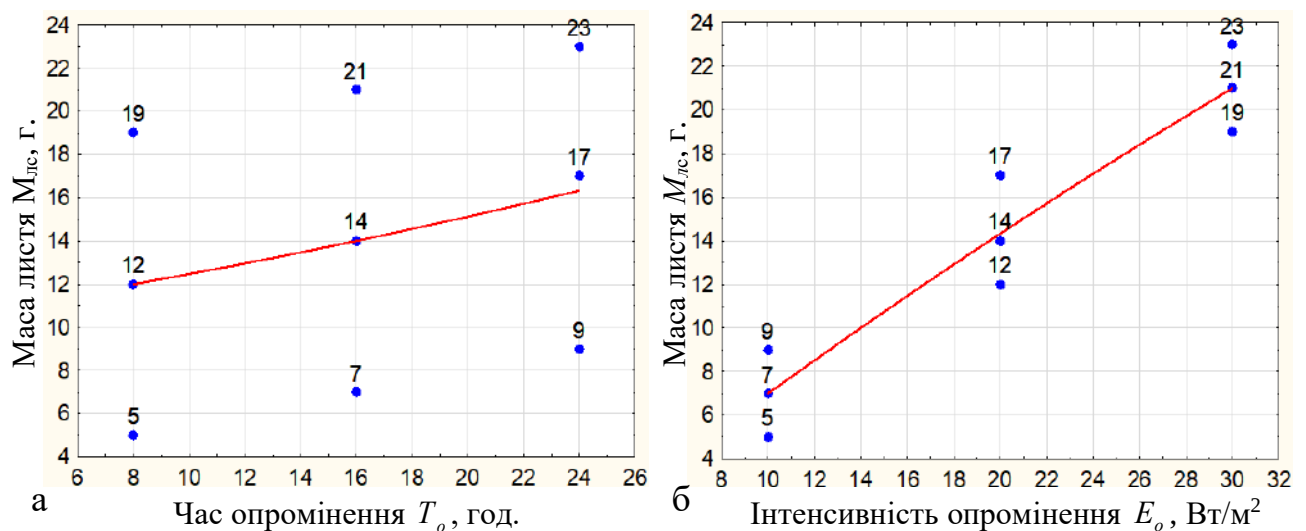


Рисунок 4.12 – Діаграма розсіювання експериментальних даних залежності зміни маси листя $M_{\text{лс}}$ рослин салату як функція: а – $M_{\text{лс}} = f_M(T_o)$;

б – $M_{\text{лс}} = f_M(E_o)$

Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни площі листової поверхні $S_{\text{лс}}$ рослин салату як функція $S_{\text{лс}} = f_S(T_o)$ та $S_{\text{лс}} = f_S(E_o)$ наведена на рис. 4.13.

Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни маси листя $M_{лс}$ рослин салату як функція $M_{лс} = f_M(T_o)$ та $M_{лс} = f_M(E_o)$ наведена на рис. 4.14.

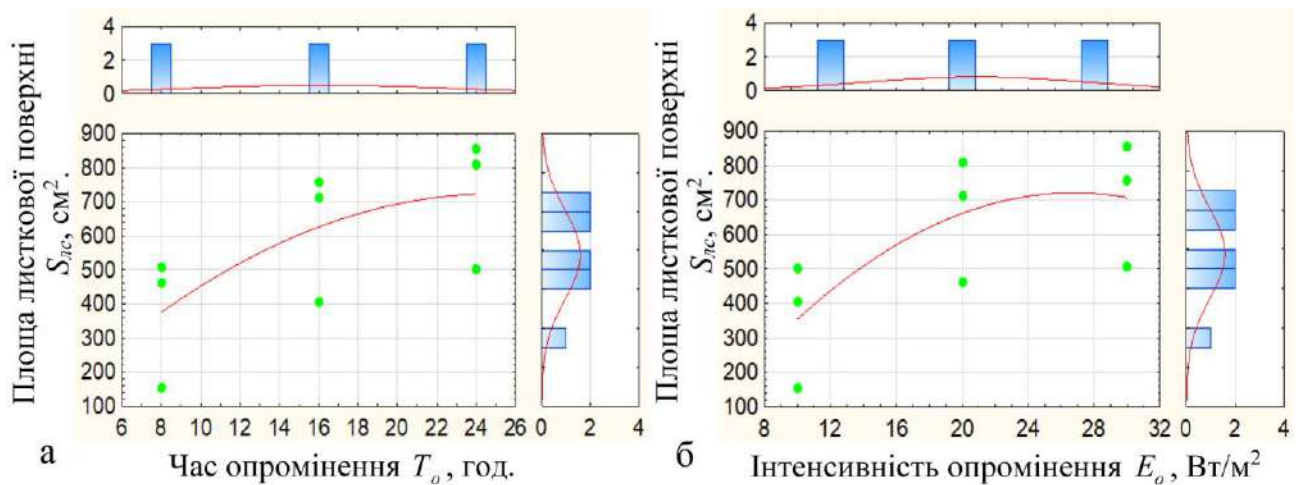


Рисунок 4.13 – Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату як функція: а – $S_{лс} = f_S(T_o)$; б – $S_{лс} = f_S(E_o)$

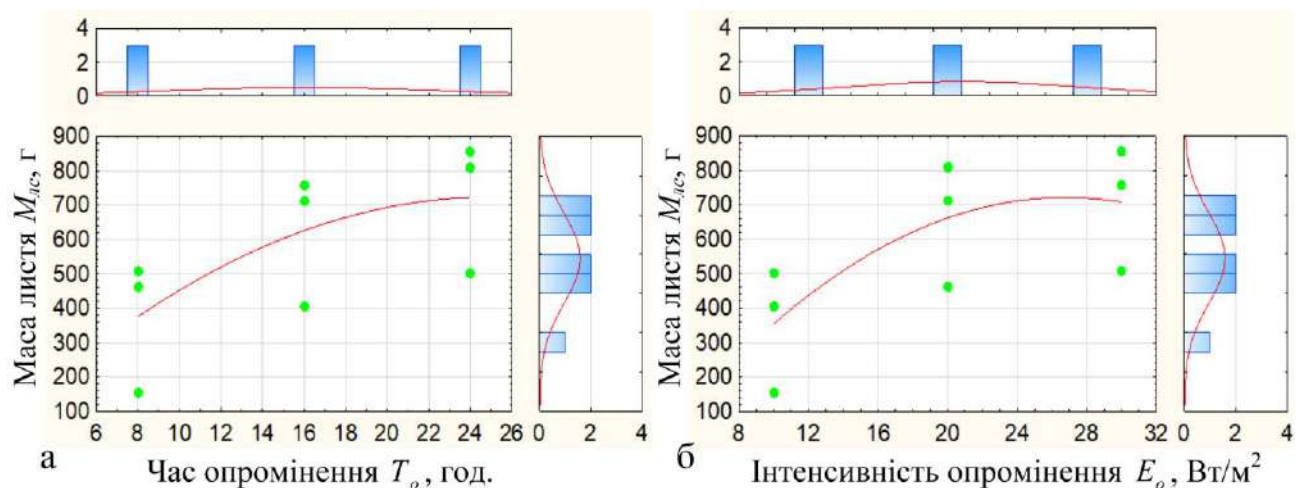


Рисунок 4.14 – Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни маси листя $M_{лс}$ рослин салату як функція: а – $M_{лс} = f_M(T_o)$; б – $M_{лс} = f_M(E_o)$

Визначальними, або домінантними факторами, які суттєво впливають на зміну площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату є час опромінення T_o та інтенсивність опромінення E_o рослин салату, рис. 4.9:

- за зміни часу опромінення T_o в діапазоні від 8 до 24 год. площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази;

- за зміни інтенсивності опромінення E_o рослин в діапазоні від 10 до 30 Вт/м² площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази.

Визначальним, або домінантним фактором, які суттєво впливає на зміну маси листя $M_{лс}$ рослин салату є інтенсивність опромінення E_o рослин салату (рис. 4.10) – за зміни інтенсивності опромінення E_o рослин в діапазоні від 10 до 30 Вт/м² маса листя $M_{лс}$ рослин салату збільшується приблизно в 3,6...3,9 рази.

Функціональна зміна часу опромінення T_o рослин салату в межах збільшення від 8 до 24 год. призводить до збільшення маси листя $M_{лс}$ рослин салату, але суттєво не впливає на зміну значення $M_{лс}$.

При цьому маси листя $M_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому на 3,7...4,1 г, рис. 4.12.

Ці твердження також характерні, або підтверджуються функціональним залежностям зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ рослин салату, які наведено на рис. 4.15.

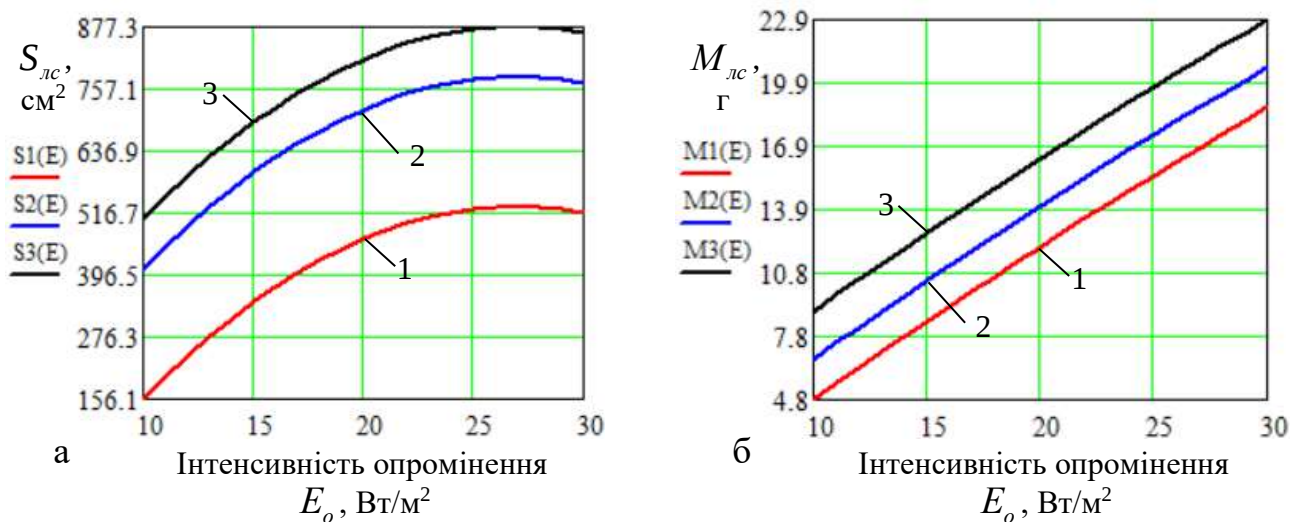


Рисунок 4.15 – Залежності зміни: а – площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату як функція $S_{лс} = f_S(E_o)$; б – маси листя $M_{лс}$ рослин салату як функція $M_{лс} = f_M(E_o)$; 1, 2, 3 – відповідно, $T_o = 8, 16, 24$ год.

Результати проведених додаткових експериментів з визначення площі листової поверхні $S_{лс}$, маси листя $M_{лс}$ та кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату залежно від дози опромінення H_o (Вт год./м²) наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Експериментальні значення площі листової поверхні $S_{лс}$, маси листя $M_{лс}$ рослин салату та кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату під час проведення додаткових досліджень

Параметр			Інтенсивність опромінення H_o , Вт год./м ²				
			10	15	20	25	30
			Доза опромінення $H_o = T_o E_o$, Вт год./м ²				
			80, 120, 160, 200, 240	120, 180, 240, 300, 360	160, 240, 320, 400, 480	200, 300, 400, 500, 600	240, 360, 480, 600, 720
Час опромінення T_o , год.	8	$S_{лс}$, см ² ; $M_{лс}$, г; $z_{лс}$, шт.	155; 5; 8	223; 5; 8	462; 7; 8	483; 15; 9	508; 18; 9
	12		223; 5; 8	348; 9; 8	502; 9; 9	524; 16; 10	548; 19; 10
	16		405; 7; 8	432; 9; 9	716; 14; 10	742; 17; 10	759; 20; 11
	20		461; 8; 8	491; 11; 9	753; 15; 10	771; 19; 11	816; 21; 12
	24		502; 9; 9	583; 13; 9	810; 17; 11	830; 21; 12	856; 23; 13

За даними табл. 4.2 побудовано діаграму зміни параметрів росту рослини салату залежно від дози опромінення H_o :

- площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату (рис. 4.16);
- маси листя $M_{лс}$ рослин салату (рис. 4.17);
- кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату (рис. 4.18).

На основі аналізу побудованих діаграм можна констатувати, що:

- значне збільшення площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату (майже в 1,6 раза – від 500 до 850 см²) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 40...50 см² (рис. 4.16);

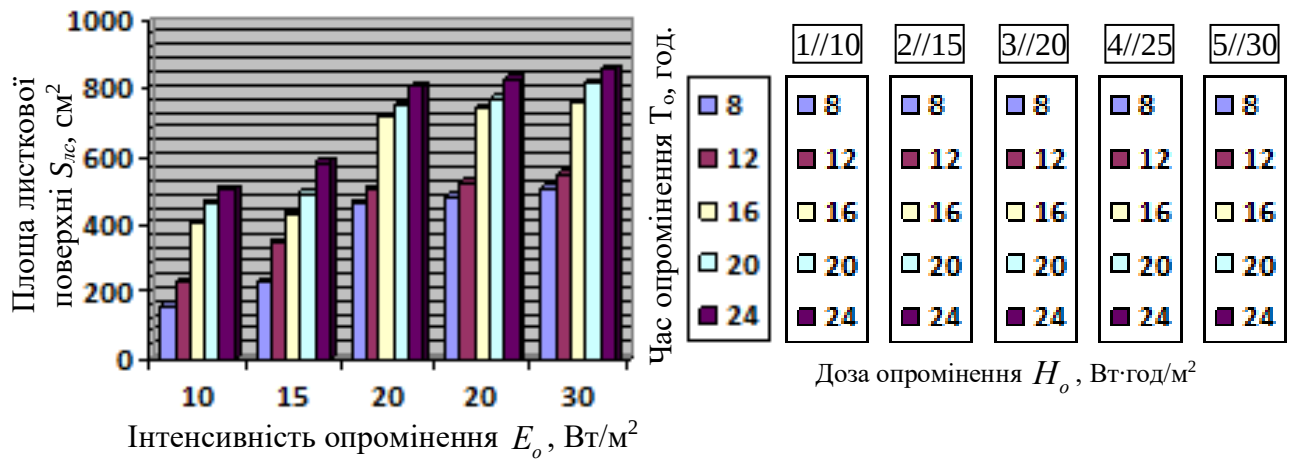


Рисунок 4.16 – Діаграма зміни площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату залежно від дози опромінення H_o :

1 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 80, 120, 160, 200, 240$ Вт год/м²;

2 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 120, 180, 240, 300, 360$ Вт год/м²;

3 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 160, 240, 320, 400, 480$ Вт год/м²;

4 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 200, 300, 400, 500, 600$ Вт год/м²;

5 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 240, 360, 480, 600, 720$ Вт год/м²

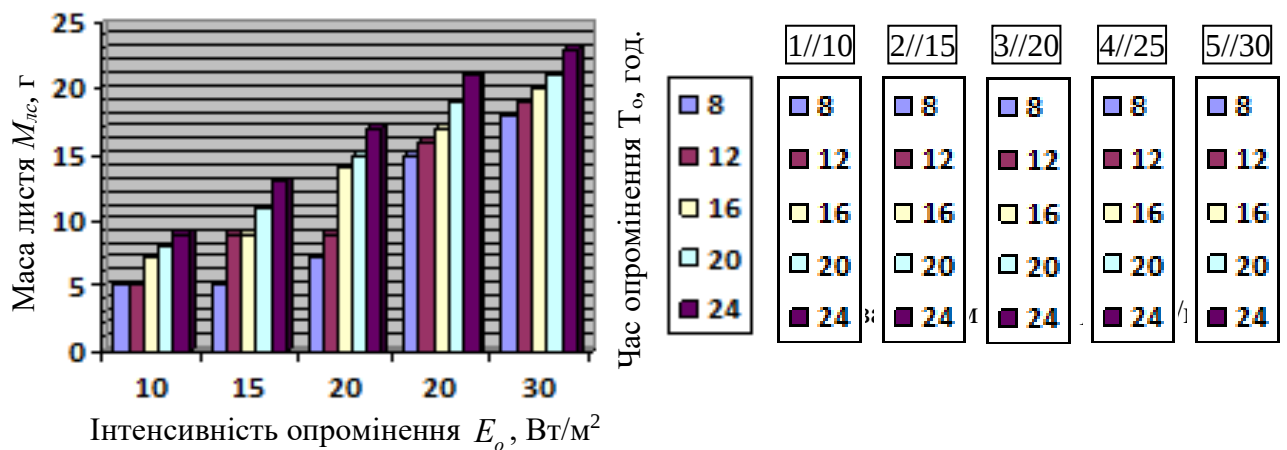


Рисунок 4.17 – Діаграма зміни маси листя $M_{лс}$ рослин салату залежно від дози опромінення H_o :

1 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 80, 120, 160, 200, 240$ Вт год/м²;

2 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 120, 180, 240, 300, 360$ Вт год/м²;

3 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 160, 240, 320, 400, 480$ Вт год/м²;

4 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 200, 300, 400, 500, 600$ Вт год/м²;

5 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 240, 360, 480, 600, 720$ Вт год/м²

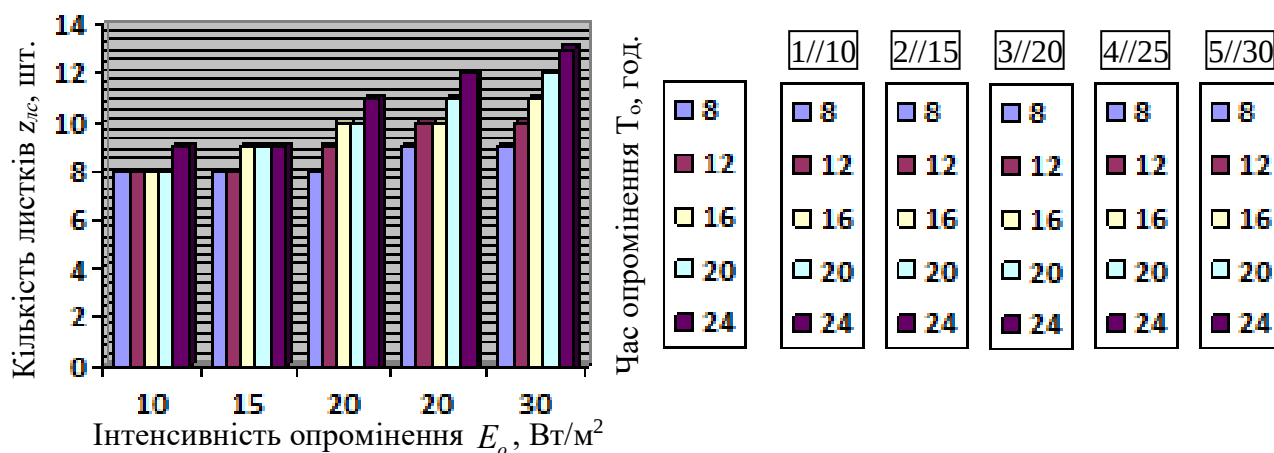


Рисунок 4.18 – Діаграма зміни кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату залежно від дози опромінення H_o :

1 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 80, 120, 160, 200, 240$ Вт год/м²;

2 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 120, 180, 240, 300, 360$ Вт год/м²;

3 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 160, 240, 320, 400, 480$ Вт год/м²;

4 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 200, 300, 400, 500, 600$ Вт год/м²;

5 – 8, 12, 16, 20, 24 – $H_o = 240, 360, 480, 600, 720$ Вт год/м²

- значне збільшення маси листя $M_{лс}$ рослин салату (майже в 3 рази – від 5 до 15 г) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст маси листя $M_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 1,5...2,0 г (рис. 4.17);

- кількість листків $z_{лс}$ на рослинах салату в межах зміни дози опромінення $80 \leq H_o \leq 200$ Вт год./м² майже не змінюється та становить в середньому 8 шт., а інтенсивність приросту за дози опромінення до 300 Вт год./м є постійною та дорівнює 1 шт. (рис. 4.18).

Отримані емпіричні математичні моделі, які регламентують взаємозв'язок показників продуктивності рослин салату та параметри навколишнього середовища під час гідропонного вирощування продукції дозволяють обґрунтувати процес росту рослин шляхом підбору необхідних значень зовнішніх параметрів, забезпечуючи при цьому максимальну продуктивність.

4.3. Результати експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта заповнення площі поверхні лотка

Згідно з методикою проведення експериментальних досліджень, яку викладено в пп. 3.3 розділу 3 дисертаційної роботи, отримано експериментальні дані зміни площі S_z заповнення насінням сочевиці загальної площі $S_l = 0,165 \text{ м}^2$ поверхні лотка одноярусної гідропонної установки або зміни площі розшарування (розподілу) завантаженої норми рухомого шару насіння сочевиці по загальній площі поверхні лотка залежно від зміни вхідних факторів (табл. 4.3) та відповідний експериментальний масив даних зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} , який розраховано за формулою 3.4 та який наведено в додатку Є.1.

Таблиця 4.3 – Експериментальні дані площі S_{iz} заповнення насінням сочевиці загальної площі S_l поверхні лотка одноярусної гідропонної установки

№ експ.	Вхідні фактори			Площа заповнення S_{iz} , м ²			
				Повторності			Середнє значення S_{zc} , м ²
	w_3 , %	α_l , град.	n_l , раз	1-ша	2-га	3-я	
1	(+) 18	(+) 30	(0) 3	0,116	0,116	0,119	0,117
2	(-) 10	+	(+) 5	0,165	0,165	0,165	0,165
3	+	(-) 10	0	0,99	0,102	0,99	0,1
4	-	-	0	0,119	0,121	0,12	0,12
5	+	(0) 20	+	0,152	0,149	0,152	0,151
6	-	0	+	0,160	0,162	0,161	0,161
7	+	0	(-) 1	0,097	0,095	0,97	0,096
8	-	0	-	0,112	0,117	0,114	0,114
9	0 (14)	+	+	0,143	0,138	0,145	0,142
10	0	-	+	0,125	0,129	0,126	0,126
11	0	+	-	0,091	0,093	0,092	0,092
12	0	-	-	0,084	0,086	0,083	0,084
13	0	0	0	0,097	0,096	0,098	0,098
14	0	+	0	0,119	0,118	0,120	0,119
15	-	-	-	0,091	0,093	0,092	0,092

Загальний вигляд етапів процесу розшарування завантаженої норми рухомого шару насіння сочевиці по поверхні лотка одноярусної гідропонної установки наведено на рис. 4.19.



а



б



в



г



д



ж

Рисунок 4.19 – Етапи процесу розшарування завантаженої норми рухомого шару насіння сочевиці по поверхні лотка одноярусної гідропонної установки: а, б, в, г, д, ж – відповідно при $n_{\lambda} = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ разів; $w_s = 10\%$; $\alpha_{\lambda} = 30$ град.

В подальшому розподілене насіння сочевиці піддавалося дозований обробці живильним розчином за методом «стікаючих відходів» та забезпечувалось пророщування в умовах штучного освітлення (рис. 4.20).



Рисунок 4.20 – Експериментальні дослідження процесу вирощування мікрозелені сочевиці на поверхні лотка одноярусної гідропонної установки

За результатами статистичних розрахунків шляхом послідовного перебору відомих алгебраїчних функцій було встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,969$ (Додаток Ж.1), який є значимим з вірогідністю $P = 0,99$, відповідає апроксимуючій математичній моделі повного квадратного полінома другої степені, або

$$k_{ze} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4.6)$$

де k_{ze} – експериментальне значення коефіцієнта заповнення;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти регресії відповідних

значень вхідних факторів x_i ;

x_1, x_2, x_3 – вхідні натуральні фактори.

Отримані за результатами статистичних розрахунків експериментальних даних коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка, (Додаток Ж.1) згідно з залежностями (В.4) та (В.5) додатку В значення коефіцієнтів рівняння регресії $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ при відповідних натуральних факторах і їх взаємодії, наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Натуральні значення коефіцієнтів b_i рівняння регресії коефіцієнта заповнення k_{ze}

Позначення	Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії				
$k_{ze} = f_k(w_3; \alpha_n; n_n)$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
	1,27	-0,11	$-0,26 \cdot 10^{-2}$	0,09	$0,62 \cdot 10^{-3}$
	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
	$-0,64 \cdot 10^{-2}$	$-0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	0,01

У процесі проведення статистичної перевірки значимості коефіцієнтів $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ рівняння регресії за t -критерієм Ст'юдента було встановлено, що всі коефіцієнти емпіричної моделі є значущими, або суттєвими (Додаток Ж.2).

Згідно з аналізом значимості коефіцієнтів $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ рівняння регресії та після перевірки адекватності емпіричного рівняння за F -критерієм Ст'юдента, отримано кінцеву математичну модель, яка характеризує функціональну зміну коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці залежно від зміни вхідних факторів у межах (за вірогідності 0,95):

- вологості зерна $10 \leq w_3 \leq 18$ (%);
- кута нахилу лотка $10 \leq \alpha_n \leq 30$ (град.);
- кількості коливань лотка $1 \leq n_n \leq 5$ (разів).

$$k_{ze} = 1,27 - 0,11w_3 - 0,26 \cdot 10^{-2}\alpha_n + 0,09n_n + 0,62 \cdot 10^{-3}w_3\alpha_n - \\ - 0,64 \cdot 10^{-2}w_3n_n - 0,27 \cdot 10^{-3}\alpha_n n_n + 0,34 \cdot 10^{-2}w_3^2 + 0,3 \cdot 10^{-4}\alpha_n^2 + 0,01n_n^2. \quad (4.7)$$

За отриманими значеннями зміни коефіцієнта заповнення k_z площі лотка насінням сочевиці згідно з моделлю (4.7) побудовано графічну інтерпретацію функціональної зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} у вигляді поверхні відгуку та її двовірного переізу як функції: $k_{ze} = f_k(w_z; \alpha_l)$ – рис. 4.21; $k_{ze} = f_k(w_z; n_l)$ – рис. 4.22 $k_{ze} = f_k(\alpha_l; n_l)$ – рис. 4.23.

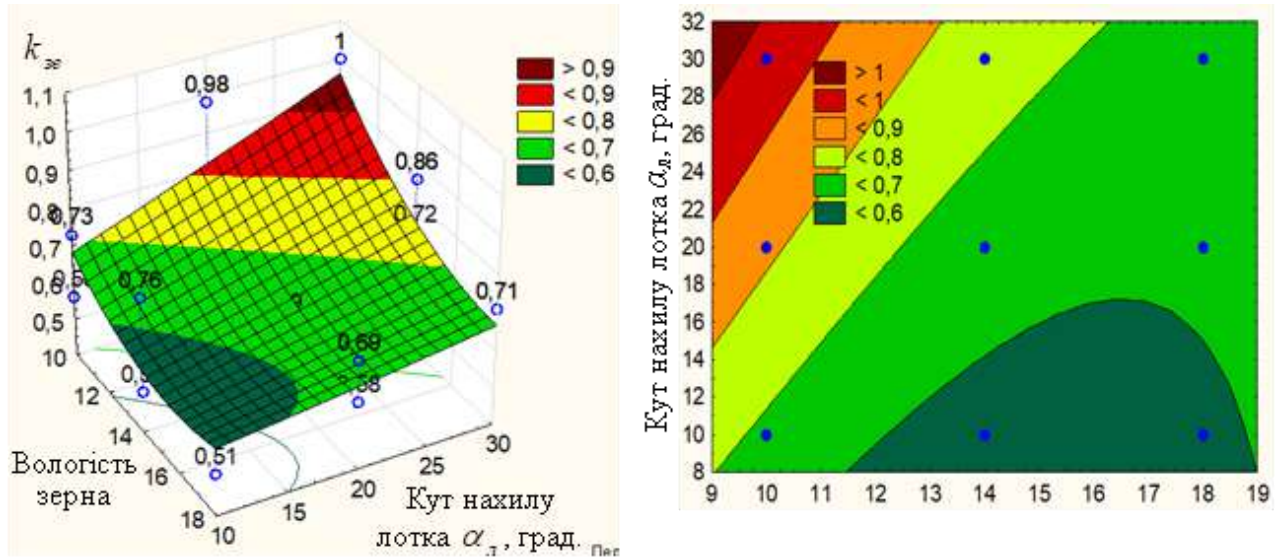


Рисунок 4.21 – Поверхня відгуку та її двовірний переріз як функція $k_{ze} = f_k(w_z; \alpha_l)$

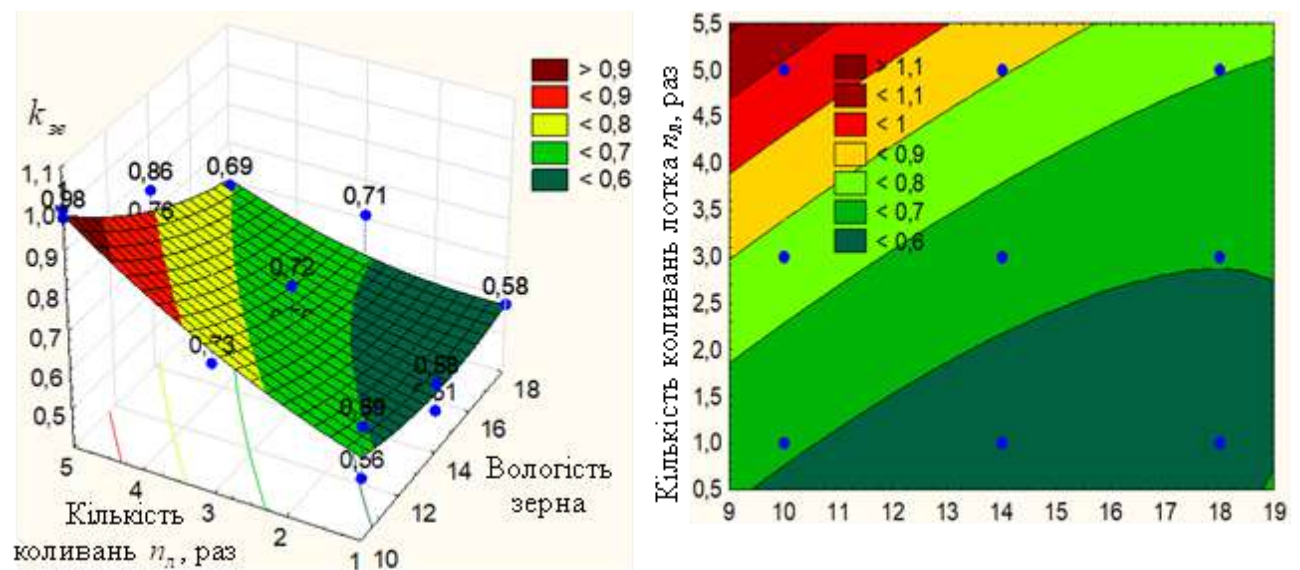


Рисунок 4.22 – Поверхня відгуку та її двовірний переріз як функція $k_{ze} = f_k(w_z; n_l)$

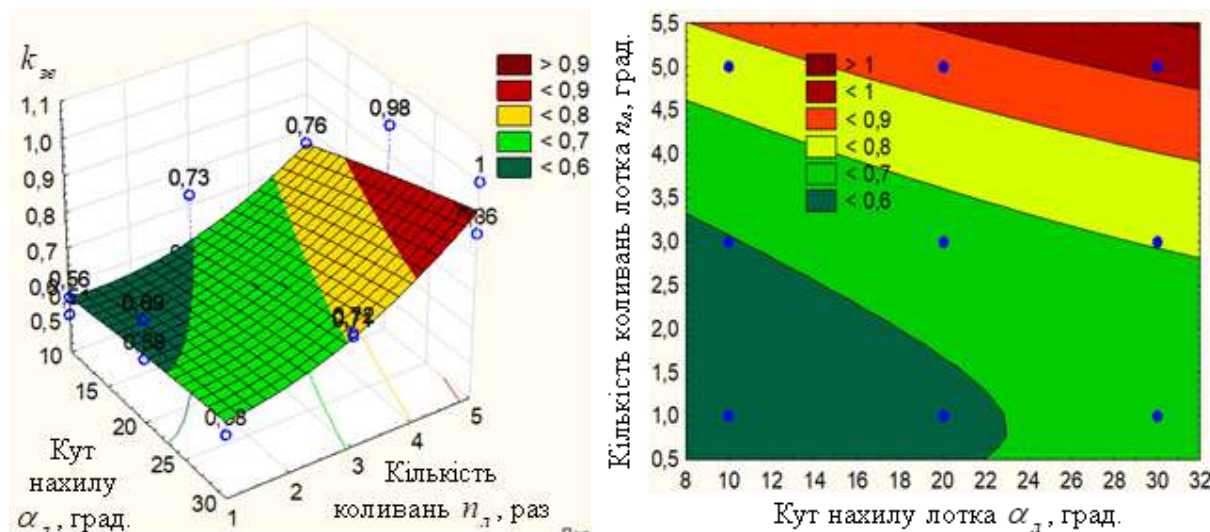


Рисунок 4.23 – Поверхня відгуку та її двовірний переріз як функція $k_{ze} = f_k(\alpha_l; n_l)$

На основі проведеного аналізу графічних побудов (рис. 4.21–4.23) встановлено, що значення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці, які отримано в результаті апроксимації експериментального масиву даних (додаток Ж.2) та розраховані за моделлю (4.7) змінюються в межах від 0,53 до 0,98, при цьому вірогідність розсіювання апроксимованих значень k_{ze} підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95, що характерно та підтверджується графічним побудовам, які наведено на рис. 4.24 та рис. 4.25.

Визначальними, або домінантними факторами, які суттєво впливають на зміну коефіцієнта заповнення k_{ze} є кут нахилу α_l лотка до горизонту та кількість коливань n_l лотка (рис. 4.21–4.23):

- за зміни кута нахилу α_l лотка в діапазоні від 10 до 30 град. коефіцієнт заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці збільшується в середньому в 1,2...1,3 рази;

- за зміни кількості коливань n_l лотка в діапазоні від 1 до 5 разів коефіцієнт заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці збільшується в середньому в 1,4...1,5 рази.

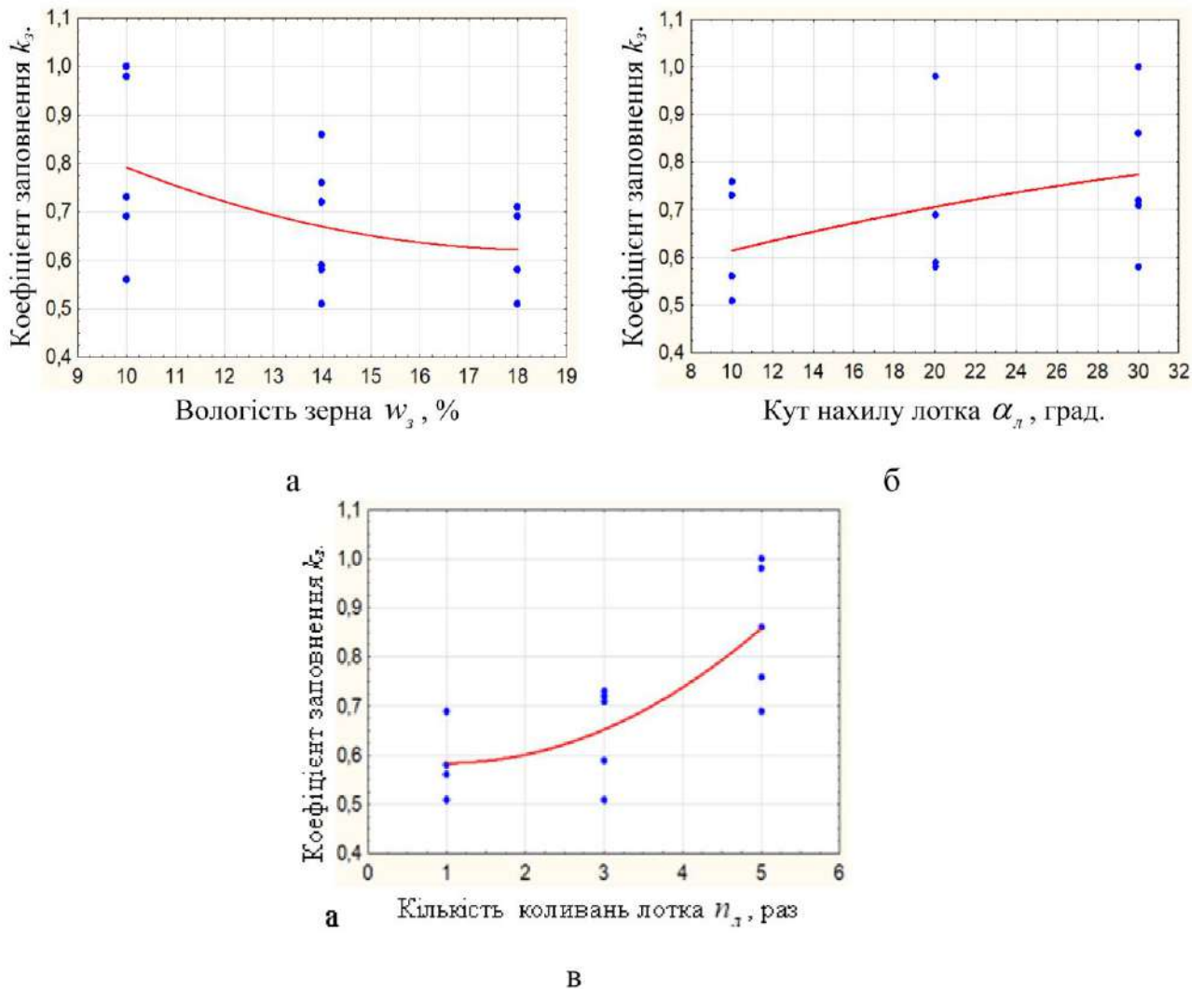


Рисунок 4.24 – Діаграма розсіювання експериментальних даних залежності зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} як функція: а – $k_{ze} = f_k(w_z)$; б – $k_{ze} = f_k(\alpha_l)$; в – $k_{ze} = f_k(n_l)$.

Функціональна зміна вологості зерна w_z в межах збільшення від 14 до 18% призводить до зменшення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка насіння сочевиці, але суттєво не впливає на зміну значення коефіцієнта заповнення k_{ze} . При цьому коефіцієнт заповнення k_{ze} зменшується: при $n_l = 1$ раз в середньому на 0,2; при $n_l = 3$ рази в середньому на 0,2; при $n_l = 5$ раз в середньому на 0,3.

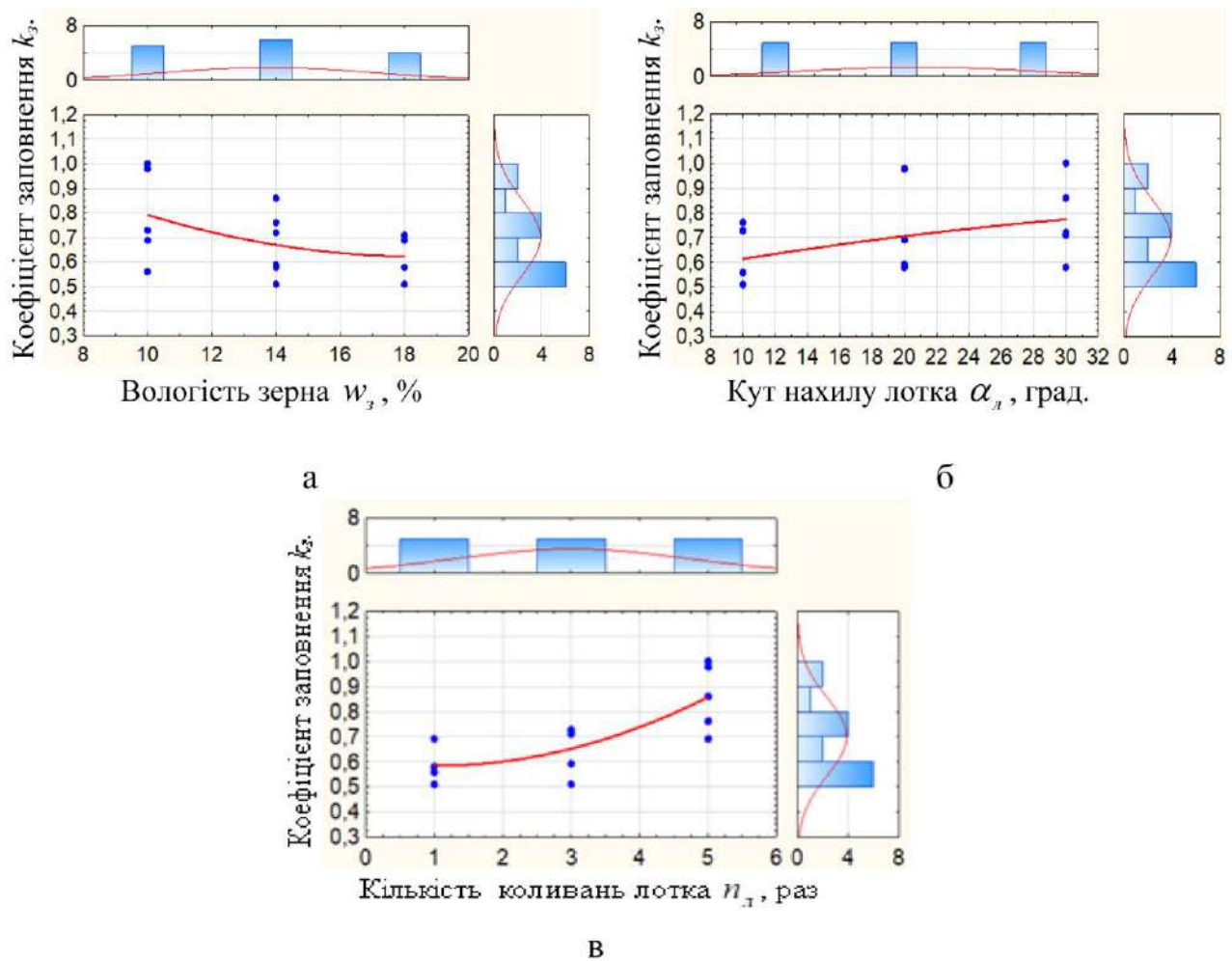


Рисунок 4.25 – Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} як функція: а – $k_{ze} = f_k(w_z)$; б – $k_{ze} = f_k(\alpha_l)$; в – $k_z = f_k(n_l)$.

Ці твердження також підтверджуються функціональними залежностями, які наведено на рис. 4.26 та рис. 4.27а та які визначають функціональну зміну коефіцієнта заповнення площі лотка насінням сочевиці.

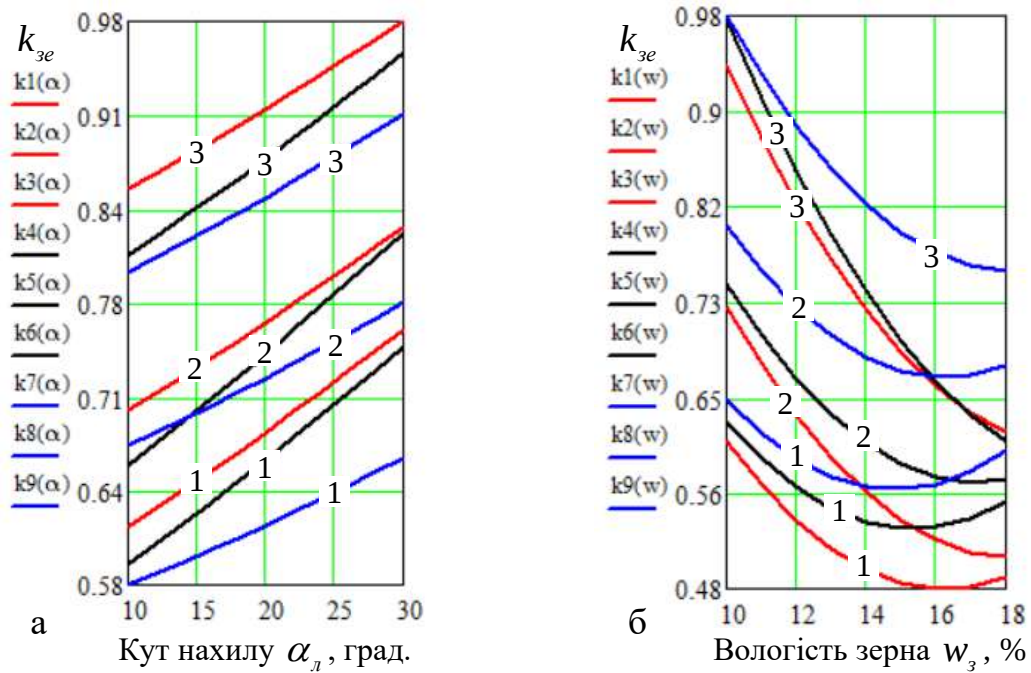


Рисунок 4.26 – Залежність зміни коефіцієнт заповнення k_{ze} як функція:
 а – $k_{ze} = f_k(\alpha_l)$, $k1(\alpha)$, $k2(\alpha)$, $k3(\alpha)$ – $w_s = 14\%$; $k4(\alpha)$, $k5(\alpha)$, $k6(\alpha)$ – $w_s = 16\%$; $n_l = 5$ раз; $k7(\alpha)$, $k8(\alpha)$, $k9(\alpha)$ – $w_s = 18\%$; б – $k_{ze} = f_k(w_s)$, $k1(w)$, $k2(w)$, $k3(w)$ – $\alpha_l = 10$ град.; $k4(w)$, $k5(w)$, $k6(w)$ – $\alpha_l = 20$ град.; $k7(w)$, $k8(w)$, $k9(w)$ – $\alpha_l = 30$ град.; 1, 2, 3 – відповідно, $n_l = 1, 3, 5$ раз

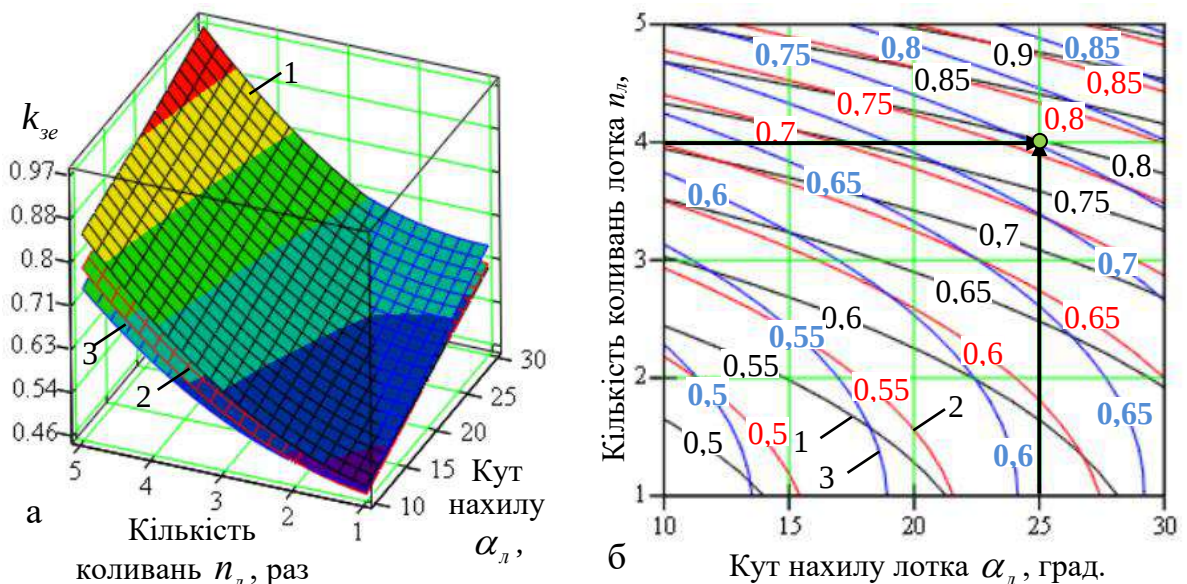


Рисунок 4.27 – Графічна інтерпретація зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} :
 а – як функція $k_{ze} = f_k(\alpha_l; n_l)$; б – номограма як функція $k_{ze} = f_k(\alpha_l; n_l)$; 1, 2, 3 – відповідно, $w_s = 14, 16, 18\%$

На рис. 4.28 наведено графічні залежності зміни коефіцієнта заповнення k_{zi} площі лотка як функція $k_{zi} = f_k(n_l)$, які встановлюють адекватність розроблених теоретичної (2.45) та емпіричної (4.7) моделей.

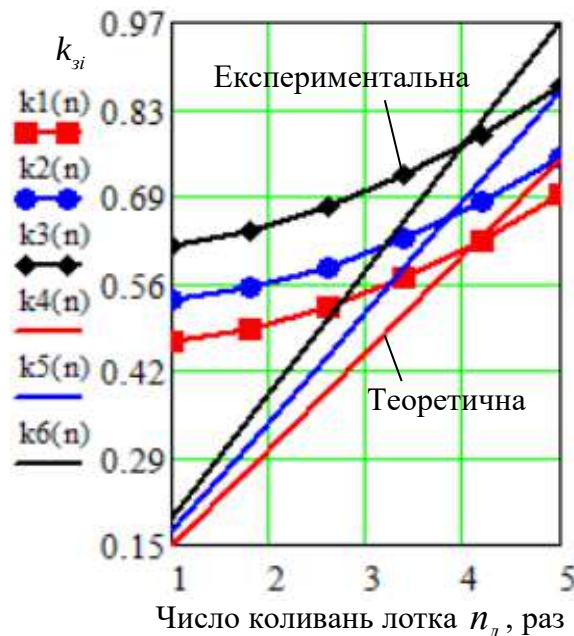


Рисунок 4.28 – Залежність зміни коефіцієнта заповнення k_{zi} площі лотка, як функція $k_{zi} = f_k(n_l)$: $k1(n)$, $k4(n)$ – $\alpha_l = 10$ град.; $k2(n)$, $k5(n)$ – $\alpha_l = 20$ град.; $k3(n)$, $k6(n)$ – $\alpha_l = 30$ град.

На основі порівняльного аналізу побудованих залежностей (рис. 4.28) встановлено, що розбіжність між теоретичними значеннями коефіцієнта заповнення k_z , які отримано згідно з моделлю (2.45) та емпіричними значення коефіцієнта заповнення k_{ze} , які отримано згідно з моделлю (4.7) коливається в межах 5...25 %. При цьому за кількості коливань лотка $n_l = 3$ і 4 рази різниця значень k_z і k_{ze} незначна та становить у середньому 5...10 %.

На рис. 4.27б наведено номограму функціональної залежності зміни коефіцієнта заповнення k_{ze} як функція $k_{ze} = f_k(\alpha_l; n_l)$.

Для прогнозованого визначення імовірного значення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці необхідно вибрати (рис. 4.27б):

- заданий кут нахилу α_l лотка (наприклад, $\alpha_l = 25$ град.);

- задану кількість коливань лотка n_l (наприклад, $n_l = 4$ рази);
- на перехресті проведених ліній по осі абсцис і ординат отримуємо значення коефіцієнта заповнення $k_{ze} = 0,8$ для вологості зерна 18%.

4.4. Висновки до розділу

4.4.1. Встановлено, що за зміни часу опромінення T_o та інтенсивності опромінення E_o рослин відповідно, в діапазоні від 8 до 24 год. та від 10 до 30 Вт/м² площа листкової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази.

4.4.2. Домінантним фактором, який суттєво впливає на зміну маси листя $M_{лс}$ рослин салату є інтенсивність опромінення E_o рослин салату – за зміни інтенсивності опромінення E_o рослин в діапазоні від 10 до 30 Вт/м² маса листя $M_{лс}$ рослин салату збільшується приблизно в 3,6...3,9 разів.

4.4.3. Значне збільшення площі листкової поверхні $S_{лс}$ рослин салату (майже в 1,6 рази – від 500 до 850 см²) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст площі листкової поверхні $S_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 40...50 см².

4.4.4. Значне збільшення маси листя $M_{лс}$ рослин салату (майже в 3 рази – від 5 до 15 г) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст маси листя $M_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 1,5...2,0 г.

4.4.5. Кількість листків $z_{лс}$ на рослинах салату в межах зміни дози опромінення $80 \leq H_o \leq 200$ Вт год./м² майже не змінюється та становить в середньому 8 шт., а інтенсивність приросту за дози опромінення до 300 Вт год./м є постійною та дорівнює 1 шт. (рис. 4.18).

4.4.6. Встановлено, що за зміни кута нахилу $\alpha_{\text{л}}$ лотка в діапазоні від 10 до 30 град. та кількості коливань $n_{\text{л}}$ лотка в діапазоні від 1 до 5 раз коефіцієнт заповнення $k_{\text{зе}}$ площі лотка насінням сочевиці збільшується в середньому в 1,2...1,5 рази. Розбіжність теоретичних і експериментальних значень коефіцієнта заповнення площі лотка посівним матеріалом знаходиться в діапазоні від 5 до 25%.

4.4.6. Функціональна зміна вологості зерна w_z в межах збільшення від 14 до 18% призводить до зменшення коефіцієнта заповнення $k_{\text{зе}}$ площі лотка насінням сочевиці, але суттєво не впливає на зміну значення коефіцієнта заповнення $k_{\text{зе}}$. При цьому коефіцієнт заповнення $k_{\text{зе}}$ зменшується: при $n_{\text{л}} = 1$ раз в середньому на 0,2; при $n_{\text{л}} = 3$ рази в середньому на 0,2; при $n_{\text{л}} = 5$ раз в середньому на 0,3.

Основні результати розділу опубліковано в працях [132, 161, 189].

1. Купчук І.М., Мельник О.С. Математичне моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослинної продукції в гідропонній установці. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 1 (331). С. 83–88. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-14.

2. Мельник О.С. Моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослин в гідропонній установці : тези доп. Міжн. наук.-практичної конф. «Сучасні вектори розвитку аграрної науки». Херсон, 17-18 вересня 2024 р. С. 839-843.

3. Гончарук І.В., Купчук І.М., Солоня О.В., Мельник О.С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021 р. ; заяв. с202101016 від 22.02.2021 р.

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1. Шляхи подальшого удосконалення гідропонних установок

За результатами огляду було проаналізовано відомі системи та методи гідропоніки: статична культура розчину, культура розчину безперервного потоку (NFT), культура глибоких вод, пасивне зрошення, зрошення підводних та дренажних систем, система стікання у відходи, глибоководна культура з підживленням, поворотна система, аеропоніка, гнотова система [29].

Встановлено, що комерційне та промислове використання отримали перші три із вищезазначених методів. При цьому [132]:

- система статичного розчину культури не забезпечує необхідного насичення коріння рослин повітрям;
- за реалізації методу безперервної культури розчину можливі незначні буферизації через перебої у потоці (відключення електроенергії), затоплення води в деяких каналах і певні обмеження щодо максимальної довжини каналів;
- система глибоководної культури в промислових масштабах застосовується переважно для вирощування салату;
- інші системи недостатньо ефективні з погляду комерційного використання.

Подальше удосконалення гідропонних систем необхідно проводити на основі забезпечення автоматизованих комплексів управління процесами роботи технологічного обладнання та врахування фізико-механічних характеристик посівного матеріалу, які суттєво впливають на процеси завантаження насіння на робочі лотки, його рівномірному розосередженню та в кінцевому випадку ефективного проростання та подальшого росту [190, 191].

Для усунення існуючих недоліків, нами запропоновано конструктивні схеми удосконалених гідропонних установок, застосування яких забезпечить такі переваги:

- універсальність використання (можливість вирощування різних видів

рослин);

- гармонізація оптимального забезпечення сільськогосподарських культур водою, поживними речовинами, світлом і повітрям;

- максимальне використання площі приміщення, збільшення площі для кожної рослини та підтримка її стебла й паростків.

Схему удосконаленої гідропонної установки наведено на рис. 5.1 [29, 38].

Коріння 8 рослин 7 розташовані в кошиках 6, виготовлених з металевої сітки та наповнених мінеральним поживним розчином (див. елемент I на рис. 5.1). Кошки мають циліндричну форму і обладнані затискачами. За допомогою затискачів кошки вільно встановлюються на дошках 9.

Дошки 9 можуть переміщатися в прорізі 5 барабана 36. Крім того, кошки 6 можуть рухатися вздовж дощок 9, і таким чином можна змінити порядок кошок всередині барабана та відстань між найближчими кошками залежно від розмірів рослин у різні періоди їхнього росту.

Для підвищення жорсткості барабана до його верхнього краю кріпляться стрижні 24, які також з'єднують барабан з валом 19. У нижній частині барабана 36 кріпляться металеві сітки 33, 37. На нижній поверхні сітки 37 встановлені вентилятори 10 і лампи 34. Вентилятори 10 забезпечують інтенсивну подачу повітря до коренів рослин. Є також лампи 35 біля стелі.

Після збільшення відстаней між найближчими кошками порожні місця можна заповнити поживною речовиною, яка вкладається на сітку 33. Вал 19 встановлюється в упорних підшипниках 20, які закріплені на стіні та на підлозі приміщення. На валу 19 є кілька барабанів 36, залежно від висоти рослин та необхідних умов для догляду за ними (див. нижче).

Насос 13, який приводиться в дію від електричного двигуна 14 через муфту 41, забезпечує підживлення води з добавками поживної речовини з бака 32. Ця суміш збагачена киснем, що подається компресором 12 з приводом від електричного двигуна 11 через муфту 42. Збагачена суміш йде гідравлічними магістралями 4 і 2 та через гнучкі шланги 3, подається до рослин 7.

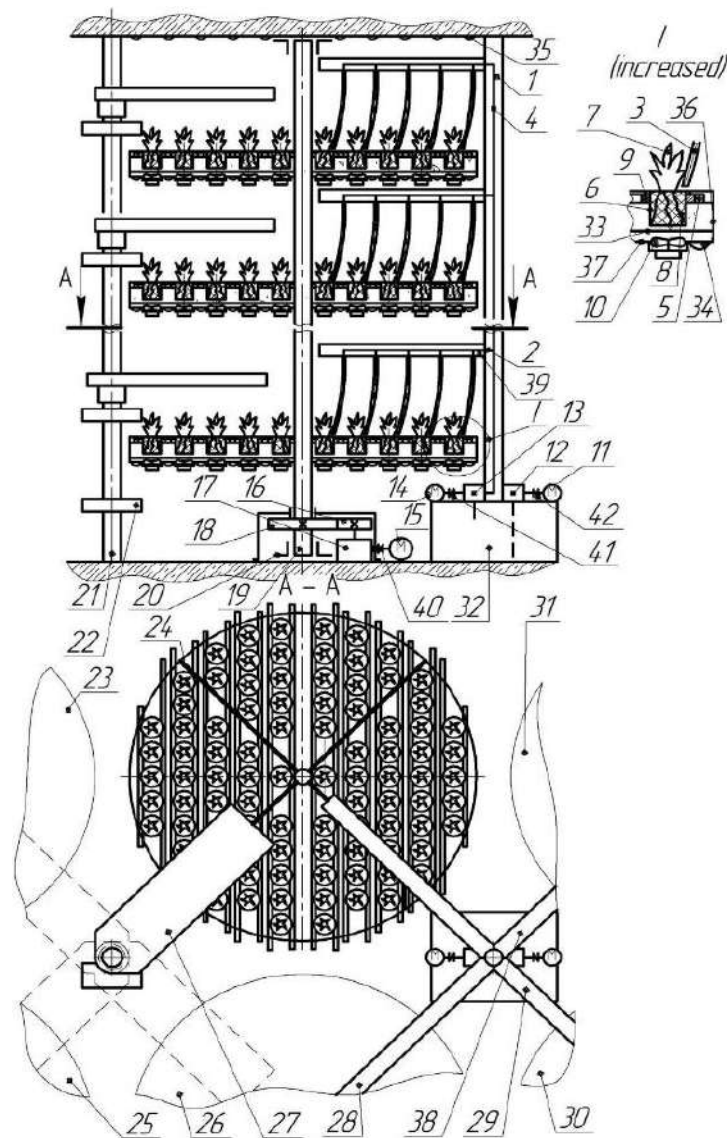


Рисунок 5.1 – Конструктивна схема удосконаленої гідропонної установки: 1 – трубка; 2, 4 – гідравлічні магістралі; 3 – гнучкий шланг; 5 – прорізи; 6 – кошик (стакан); 7 – рослина; 8 – коріння рослини; 9 – дошка; 10 – вентилятор; 11, 14, 15 – електродвигун; 12 – компресор; 13 – насос; 16, 18 – шестерні; 17 – коробка передач; 19 – вал; 20 – підшипник; 21 – полиця; 22 – сходи́нка полиці; 23, 25, 26, 30, 31, 36 – барабан; 24 – стрижні; 27 – поворотна полиця; 28, 29, 38, 39 – штанга; 32 – резервуар; 33, 37 – металева сітка; 34, 35 – лампа; 40, 41 – муфта

Гідравлічні магістралі 4 і 2 регулюються всередині трубки 1 планкою 39. Як бачимо на перерізі А – А, суміш з резервуара 32 подається одночасно до чотирьох барабанів 36, 31, 30, 26 штангами 28, 29, 38, 39. Шланги 3 можуть згинатися відповідно до форми та розмірів посівів.

Для постачання поживною сумішшю всіх рослин призначені барабани 36 розташовані на валу 19, який обертається від електричного двигуна 15 через муфту 40, черв'ячно-колісну коробку передач 17 і шестерні 16, 18.

Керування періодичним обертанням валу 19 і подачею суміші з бака 32 забезпечується автоматизованою системою за допомогою датчиків. Догляд за рослинами високого рівня (посадка, зміна місця розташування кошиків по ходу вирощування рослин, збирання врожаю) забезпечується за допомогою поворотної полиці 27 із сходишками 22, встановленими на полицях 21. При цьому кожна поворотна полиця певного рівня призначена для догляду за рослинами з чотирьох барабанів (23, 25, 26, 36).

Конструктивну схему вдосконаленої ланцюгової гідропонної установки наведено на рис. 5.2 [29, 38].

Рухи ланцюгів забезпечують ланцюгові колеса 23, 27, які встановлюються за допомогою кронштейнів 24, 28 біля підлоги та стелі приміщення. Ланцюгове колесо 23 приводиться в рух від електричного двигуна 16 через муфту 17 і черв'ячну передачу 29, 22.

Вертикальна відстань між найближчими кожухами залежить від розмірів рослин, вимог до їх вирощування, і може бути змінена шляхом перестановки стрижнів 31.

Насос 33 приводиться в дію від електричного двигуна 15 через муфту 21 і забезпечує подачу води з добавками поживних речовин з бака 19. Ця суміш збагачена киснем, що подається компресором 34, який має привід від електричного двигуна 18 через муфту 20.

З метою підвищення ефективності роботи гідравлічної системи установки збагачена суміш подається з резервуара 19 гідравлічною магістраллю 4 у збірний бак 38. Після заповнення бака 38 насос 33 вимикається.

Обприскування рослин 7 здійснюється сумішшю з резервуара 38 за командою автоматизованої системи управління (вона не представлена на рисунку) через кран 37 з електромагнітним управлінням, гідравлічні магістралі 30, 2 та форсунки 35.

Витрата суміші в гідравлічних магістралях 4, 30, 2 регулюється кранами, встановленими в трубах 1, 36.

Як можна бачити на поперечному перерізі А-А, суміш з резервуара 38 подається одночасно до подаючих труб, які закріплені на двох паралельних ланцюгах.

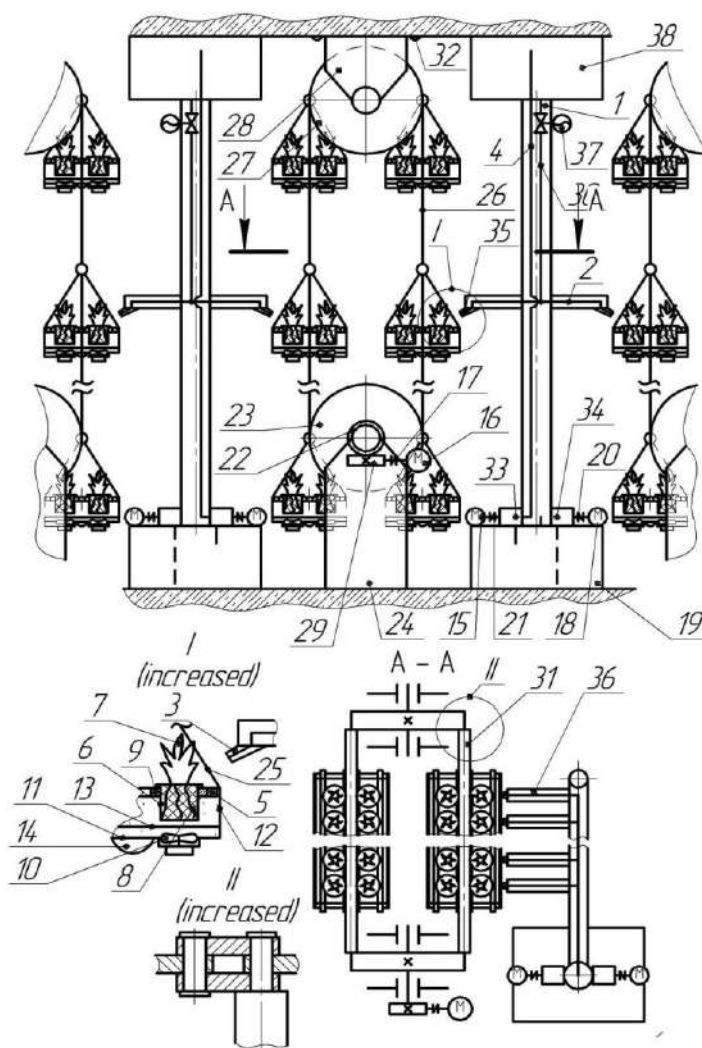


Рисунок 5.2 – Конструктивна схема удосконаленої ланцюгової гідропонної установки: 1, 36 – трубка; 2, 4, 30 – гідравлічна магістраль; 3 – гнучкий шланг; 5 – прорізи; 6 – кошик (стакан); 7 – рослина; 8 – коріння рослини; 9 – дошка; 10 – вентилятор; 11, 13 – металеві сітки; 12 – тримач системи; 14, 32, 35 – лампа; 15, 16, 18 – електродвигун; 17, 20, 21 – муфта; 19 – бак; 22, 29 – черв'ячна передача; 23, 27 – ланцюгове колесо; 24, 28 – кронштейн; 25 – металевий дріт; 26 – ланцюг; 30 – барабан; 31 – брус; 33 – насос; 34 – компресор; 37 – кран; 38 – збірний бак

Отже, залежно від розмірів приміщення, для його найбільш ефективного використання ми можемо розмістити там необхідну кількість секцій установки (що відповідає довжині приміщення) з ланцюгами оптимальної довжини (що відповідають висоті приміщення) і з довжиною опорних елементів, яка відповідає ширині приміщення.

Режим переміщення та підживлення кошиків 6 з рослинами 7 поживною сумішшю регулюється залежно від виду вирощуваних рослин і контролюється за допомогою датчиків та автоматизованої системи управління. Ця схема порівняно з попередньою схемою (рис. 5.1) забезпечує більш зручний догляд за рослинами (посадка, зміна місця розташування кошиків у ході вирощування рослин, збирання урожаю тощо).

Удосконалена промислова гідропонна установка, яку представлено на рис. 5.2, працює таким чином.

Коріння рослин 7 розташовані в кошиках 6, кожен з яких наповнений поживними речовинами (див. також елемент I на рис. 5.2). Затискачі кошиків 6 спираються на дошки 9, які можуть переміщатися в прорізах 5 прямокутних тримачів 12. Також кошики 6 можуть рухатися вздовж дощок 9, і таким чином можна змінити номер кошиків всередині системи та відстані між найближчими кошиками, залежно від розмірів рослин у різні періоди їхнього зростання.

У нижній частині тримачів 12 кріпляться металеві сітки 11, 13. На нижній поверхні сітки 11 встановлені лампи 14 і вентилятори 10, які забезпечують інтенсивне подавання повітря до коренів рослин. Біля стелі приміщення розташовані лампи 32.

Після збільшення відстаней між найближчими кошиками порожні місця можна заповнити поживними речовинами, які кладуться на сітку 13. Системи кріплення кошиків підвішують за допомогою металевих дротів 25 на брусах 31, що з'єднані з ланцюгами 26 (див. також поперечний переріз А-А та елемент II на рис. 2.2). Ланцюги 26 забезпечують постійний або періодичний рух системи 12 з рослинами для їх більш активної взаємодії з повітрям та інтенсифікації рослини всередині одного кожуха 12.

Для широкого та ефективного впровадження гідропонних установок необхідно забезпечити роздільне та чітке регулювання в широкому діапазоні постачання основних поживних речовин (азот, калій, сірка, кальцій, магній, фосфор, натрій), а також мікроелементів, кислот, солей, залежно від видів культур і фактичного вмісту поживних речовин у їх листках.

Відомі апарати для зміни подачі робочих рідин (дроселі та регулятори потоку з ручним керуванням, регулятори потоку прямої дії, апарати керування для рідкопаливних двигунів) не відповідають основним вимогам до ефективного керуючого обладнання гідропонних установок:

- можливість автоматичного контролю надходження кількох поживних речовин за допомогою одного апарату;
- функціонування в безперервному та періодичному режимі постачання, зі швидкою зміною вартості пропозиції в будь-який момент часу;
- можливість зміни подачі незалежно від тиску живильних речовин в гідравлічній системі;
- проста і надійна конструкція апарату, його створення на основі стандартизованих і нормованих елементів.

Одним із шляхів подальшого удосконалення технологічних процесів функціонування гідропонних установок є розробка та дослідження апаратури для ефективного та точного контролю надходження та дозування поживних речовин під час гідропонного вирощування різних культур.

З огляду на переваги та недоліки проаналізованого вище відомого обладнання тут були розроблені вимоги до апаратів для контролю надходження поживних речовин:

1. Можливість управління за допомогою одного апарату відкритої течії кількох дроселів для подачі різних поживних речовин.
2. Можливість автоматичної безступінчастої та точної зміни дросельних заслінок відкритих потоків.
3. Можливість попереднього визначення необхідного руху виконавчого елемента дросельної заслінки для забезпечення заданої подачі відповідного живильного речовини.

4. Можливість функціонування в безперервному та періодичному режимі постачання, зі швидкою зміною заданої подачі в будь-який момент часу.

5. Можливість зміни подачі незалежно від тиску поживних речовин в гідравлічній системі.

6. Проста і надійна конструкція апарату, його створення на основі стандартизованих і нормованих елементів.

З урахуванням цих вимог була розроблена схема вдосконаленого апарату для дозованої подачі та контролю живильних речовин в зону проростання рослин під час гідропонного вирощування сільськогосподарських культур.

Схема цього апарату представлена на рис. 5.3 [84, 192].

Поживна речовина рухається з порожнини 1 апарату, через порожнини 19, 5 і далі в гідропонній установці. Розмір отвору між порожнинами 19 і 5 регулюється за допомогою дроселя 4, який може переміщатися в корпусі 2 в осьовому напрямку.

Рух дросельної заслінки 4 і відразу зміна подачі живильних речовин регулюється за допомогою крокового двигуна 14.

У разі необхідності регулювання подачі включається двигун 14 і фрикційна муфта 11 з електромагнітним управлінням.

Обертання від крокового двигуна 14 передається через шестерні 13, 12 (шестерня 12 рухома), черв'ячні передачі 10, 9 і реєчну передачу 8, 7. Фактично стійка 7 з'єднана безпосередньо з дросельною заслінкою 4.

Крок стандартизованого крокового двигуна може становити 0,5 – 2,0. Це обертання забезпечується з високою точністю і частотою до 1000 – 2000 Гц, тому ми маємо можливість точного та швидкого регулювання подачі поживних речовин. Від того ж крокового двигуна 14 і через шестерні 13, 18, 15, 16, 17 (шестерні 18, 16, 17 можуть бути введені в зачеплення з шестернями 13 і 15 за допомогою електромагнітних муфт, аналогічних муфті 11). Обертання від шестерень 16, 17, 18 передається на аналогічний дросель (див. позицію 11 на рис. 5.3) і через аналогічні кінематичні ланцюги.

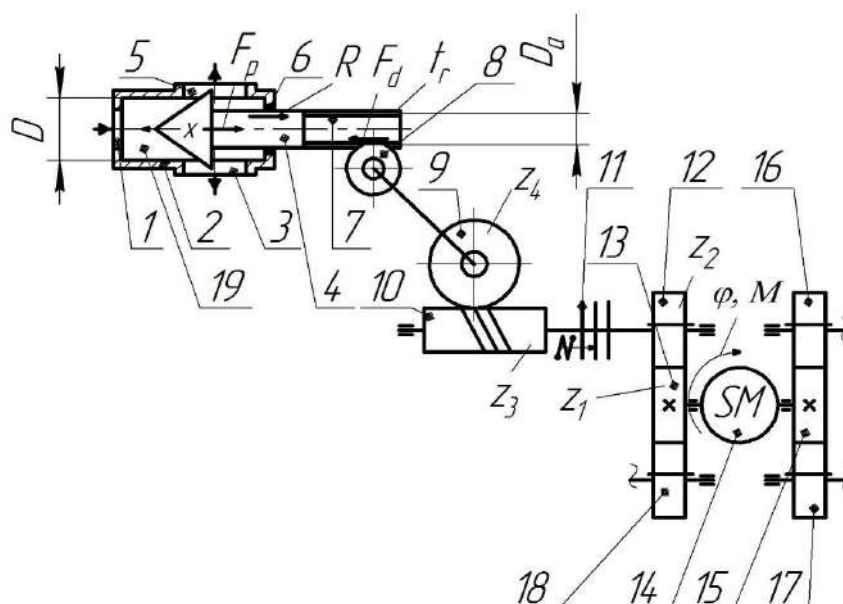


Рисунок 5.3 – Схема вдосконаленого апарату контролю подачі живильних речовин для гідропонних установок: 1 – вхідна порожнина; 2 – корпус; 3, 5 – вихідні порожнини; 4 – дросель; 6 – ущільнення; 7 – стійка; 8, 12, 13, 15, 16, 17, 18 – шестерні; 9 – черв'ячна передача; 10 – черв'як; 11 – електромагнітна з'єднувальна муфта; 14 – кроковий двигун; 19 – контрольна порожнина

В результаті з одного крокового двигуна 14 можна реалізувати незалежне управління подачею до восьми різних поживних речовин.

Отже, цей апарат відповідає сформульованим вище вимогам.

Другим напрямком подальшого удосконалення технологічних процесів функціонування гідропонних установок є розробка структурної схеми системи автоматизації функціонування сучасного гідропонного обладнання.

Мета розробки – забезпечення раціонального планування та організацію виконання всіх підготовчих та робочих процесів і операцій з оптимальним розподілом робіт між кількома підприємствами.

Також необхідно розробити блок-схему алгоритму, що забезпечує раціональне автоматичне функціонування гідропонних технологічних комплексів з перевіркою обсягів, змісту та якісних характеристик замовлень споживачів, допустимих термінів їх виконання, наявних гідропонних установок, їх потужності та технологічні можливості.

Запропоновану структурну схему автоматизованого регіонального гідропонного виробничо-логістичного об'єднання, що забезпечує виробництво та доставку споживачам зелені, фруктів та овочів наведено на рис. 5.4 [98].

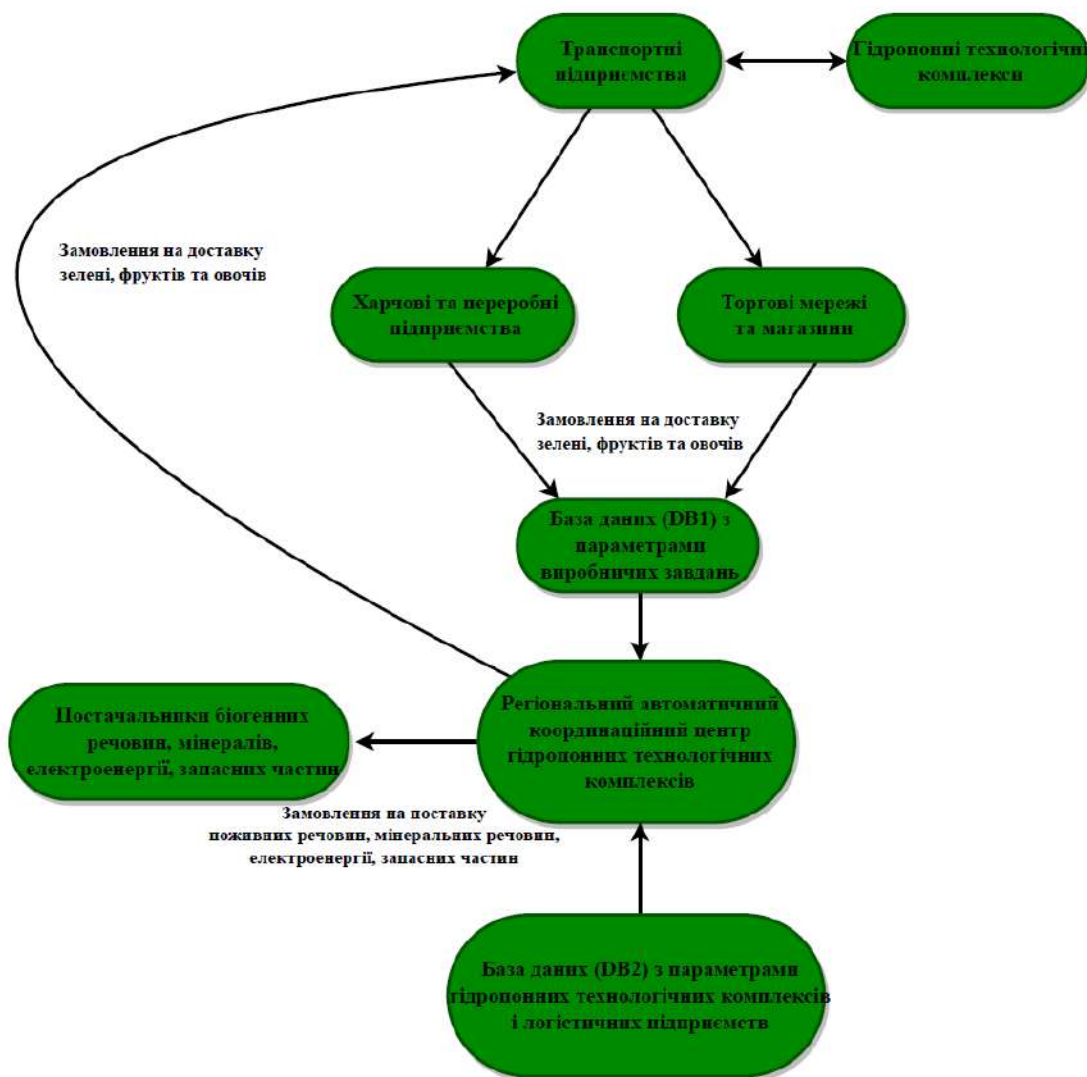


Рисунок 5.4 – Структурна схема автоматизованого регіонального гідропонного виробничо-логістичного об'єднання

Блок-схема алгоритму автоматичного синтезу та аналізу варіантів функціонування регіонального об'єднання гідропонних автоматичних технологічних комплексів представлена на рис. 5.5 [98].

Загальна організація та контроль за функціонуванням об'єднання здійснюється з регіонального автоматичного координаційного центру, який приймає замовлення від харчових і переробних підприємств, торгових мереж і магазинів на доставку продукції.

Дані про ці продукти утворюють базу даних 1 (DB1). Детальний зміст даних, наведених нижче в тексті роботи (див. також рис. 5.5).

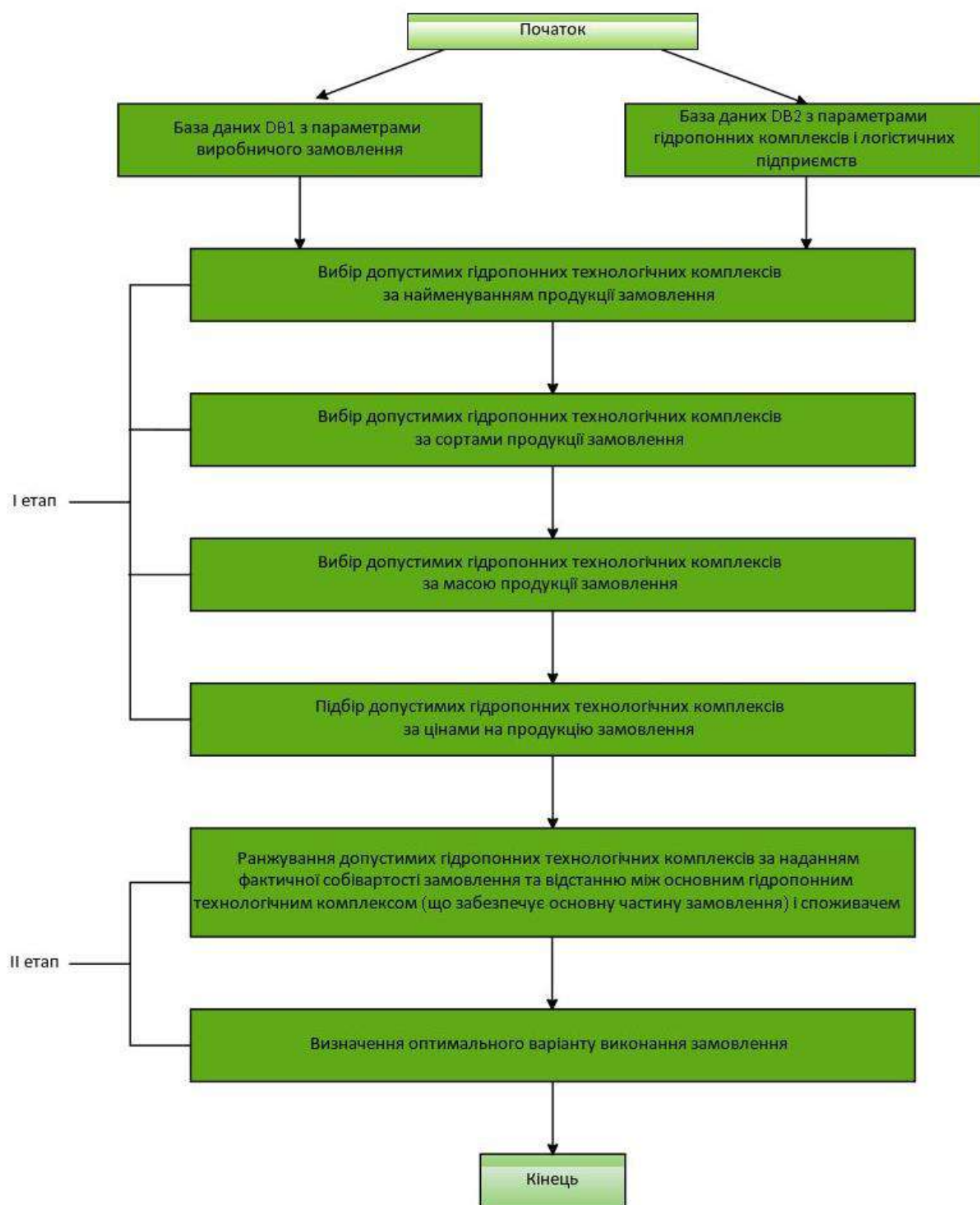


Рисунок 5.5 – Блок-схема алгоритму автоматичного синтезу та аналізу варіантів функціонування регіонального об'єднання гідропонних автоматичних технологічних комплексів

Ще одним важливим джерелом інформації є дані про гідропонні технологічні комплекси регіону (конфігурація їх виробничих потужностей та обладнання, спеціалізація, технологічні та експлуатаційні характеристики, ступінь завантаженості потужностей на момент часу, наявність потужностей – див. детальніше нижче).

Дані про обладнання гідропонних технологічних комплексів і логістичних підприємств (постачальників і транспортних компаній) утворюють базу даних 2 (*DB2*), рис. 5.5.

Комп'ютерна програма автоматичного центру аналізує дані *DB1* і *DB2* і з урахуванням основних критеріїв ефективності (терміни виконання замовлень, собівартість виконання, якісні характеристики продукції) здійснює синтез можливих варіантів замовлень, виконання – конфігурації гідропонних технологічних комплексів, які забезпечуватимуть робочі процеси.

Одночасно здійснюється пошук постачальників необхідних поживних речовин, мінералів, електроенергії, запасних частин до обладнання, а також відбір транспортних підприємств для здійснення відповідних необхідних логістичних операцій.

Після визначення всіх можливих варіантів основних технологічних і допоміжних логістичних комплексів здійснюється їх ранжування за основними критеріями ефективності з визначенням найбільш раціонального варіанту та врахуванням запасу часу та гарантованого забезпечення якісних характеристик продукції [98, 192].

DB1 має містити параметри замовлення, включаючи:

- коди назв товарів замовлення: $N_1, N_2, \dots, N_M$; ці коди можуть бути спеціально розроблені для використання в комп'ютерній програмі автоматичного синтезу та аналізу, наприклад, коди для основних видів салатів: Дубовий салат – N_{11} , Lollo Rosso – N_{12} , Butter Head – N_{13} , Айсберг – N_{14} ; ...; коди основних видів огірків: Букет Великолепності – N_{21} , Спіріт – N_{22} , Герман – N_{23} , Герда – N_{24} ,

- маси кожного виду виробів: $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{21}, M_{22}, \dots$ (числа в

позначеннях мас повинні відповідати цифрам у кодах виробів);

- сорти для кожного виду продукції: G11-i, G12-i, ..., G21-i, G22-i, ...
Залежно від виду продукції та з урахуванням відповідного стандарту, сорт (i = 1, 2 або 3) можна визначити за середнім розміром фруктів або овочів, їх масою, щільністю, стиглістю, твердістю тощо);
- допустимі ціни на кожен вид продукції: P11, P12, ..., P21, P22, ...;
- відстані від технологічних комплексів об'єднання до споживача (відстані доставки): D1, D2, ..., DM.

DB2 має містити параметри обладнання гідропонних технологічних комплексів (H1, H2, ..., HM), постачальників (S1, S2, ..., SM) та транспортних підприємств (T1, T2, ..., TM), у тому числі:

- назви продуктів, які можна вирощувати з використанням технологічних комплексів об'єднання: N11, N12, ..., N21, N22, ... – для H1; N11, N12, ..., N21, N22, ... – для H2; N11, N12, ..., N21, N22, ... – для HM;
- наявні площі [га, м²] гідропонних технологічних комплексів для вирощування призначених культур: A11, A12, ..., A21, A22, ... – для H1; A11, A12, ..., A21, A22, ... – для H2; A11, A12, ..., A21, A22, ... – для HM;
- середня врожайність, що забезпечується для кожної культури гідропонними технологічними комплексами, [т/га, кг/м²]: C11, C12, ..., C21, C22, ... – для H1; C11, C12, ..., C21, C22, ... – для H2; C11, C12, ..., C21, C22, ... – для HM;
- марки для кожного виду продукції: G11-i, G12-i, ..., G21-i, G22-i, ... – для H1; G11-i, G12-i, ..., G21-i, G22-i, ... – для H2; G11-i, G12-i, ..., G21-i, G22-i, ... – для HM (i = 1, 2 або 3);
- собівартість за кожним видом продукції, [грн/т або грн/кг]: ПК11, ПК12, ..., ПК21, ПК22, ... – для H1; PC11, PC12, ..., PC21, PC22, ... – для H2; PC11, PC12, ..., PC21, PC22, ... – для HM;
- необхідні питомі витрати електроенергії, [кВт год/т], поживних речовин, [кг/т], мікроелементів [кг/т], води [м³/т] для кожного виду продукції: E11, MC11, NU11, W11 – для N11; E12, MC12, NU12, W12 – для N12; ...; E21, MC21,

NU21, W21 – для N21; E22, MC22, NU22, W22 – для N22...(для вирощування певного виду культури можна використовувати кілька різних видів поживних речовин і мікроелементів.

У цьому випадку необхідно використовувати більш детальні дані та відповідну систему їх позначення);

- собівартість електроенергії, [грн/кВт год], поживних речовин, [грн/кг], мікроелементів [грн/кг], води [грн/м³] кожного постачальника: E1, M1, N1, W1 – для S1; E2, M2, N2, W2 – для S2; ...; EM, MM, NM, WM – для SM.

- собівартість доставки готової продукції, поживних речовин, мікроелементів, [грн./км·т] від кожного транспортного підприємства до кожного гідропонного комплексу: DB1 – для T1, DB2 – для T2, ..., DBM – для TM.

У ході першого етапу автоматичного синтезу варіантів виконання замовлення реалізується підбір регіональних гідропонних технологічних комплексів, які можуть забезпечити вирощування відповідних видів сільськогосподарських культур. Перевірка проводиться з використанням формул N11 (DB1) → N11 (DB2):

$$\begin{aligned} N12 (DB1) &\rightarrow N12 (DB2); \dots; \\ N21 (DB1) &\rightarrow N21 (DB2); \\ N22 (DB1) &\rightarrow N22 (DB2). \end{aligned} \tag{5.1}$$

Технологічні комплекси, які повністю або частково відповідають умовам (5.1), аналізуються з використанням умов:

$$\begin{aligned} G11-i (DB1) &\rightarrow G11-i (DB2); \\ G12-i (DB1) &\rightarrow G12-i (DB2); \dots; \\ G21-i (DB1) &\rightarrow G21-i (DB2); \\ G22-i (DB1) &\rightarrow G22-i (DB2). \end{aligned} \tag{5.2}$$

Відібрані комплекси перевіряються на основі ще одного блоку умов послідовно для кожного технологічного комплексу об'єднання.

Наприклад, для комплексу Н1 умови будуть такими:

$$\begin{aligned}
M_{11} (DB1) &\leq A_{11} \cdot C_{11} (DB2); \\
M_{12} (DB1) &\leq A_{12} \cdot C_{12} (DB2); \dots \\
M_{21} (DB1) &\leq A_{21} \cdot C_{21} (DB2); \\
M_{22} (DB1) &\leq A_{22} \cdot C_{22} (DB2).
\end{aligned}
\tag{5.3}$$

Остаточна перевірка першого етапу автоматизованого синтезу проводиться для кожного варіанту технологічного комплексу, кожного постачальника та транспортного підприємства за умовами:

- для варіанту використання технологічного комплексу H1, постачальника S1 та транспортного підприємства T1:

$$\begin{aligned}
P_{11} &\geq PC_{11} \cdot M_{11} + E_{11} \cdot E_1 + MC_{11} \cdot M_1 + \\
&+ NU_{11} \cdot N_1 + W_{11} \cdot W_1 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{11}; \\
P_{12} &\geq PC_{12} \cdot M_{12} + E_{12} \cdot E_1 + MC_{12} \cdot M_1 + \\
&+ NU_{12} \cdot N_1 + W_{12} \cdot W_1 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{12}; \\
P_{21} &\geq PC_{21} \cdot M_{21} + E_{21} \cdot E_1 + MC_{21} \cdot M_1 + \\
&+ NU_{21} \cdot N_1 + W_{21} \cdot W_1 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{21}; \\
P_{22} &\geq PC_{22} \cdot M_{22} + E_{22} \cdot E_1 + MC_{22} \cdot M_1 + \\
&+ NU_{22} \cdot N_1 + W_{22} \cdot W_1 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{22};
\end{aligned}
\tag{5.4}$$

- для варіанту використання технологічного комплексу H1, постачальника S2 та транспортного підприємства T1:

$$\begin{aligned}
P_{11} &\geq PC_{11} \cdot M_{11} + E_{11} \cdot E_2 + MC_{11} \cdot M_2 + \\
&+ NU_{11} \cdot N_2 + W_{11} \cdot W_2 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{11}; \\
P_{12} &\geq PC_{12} \cdot M_{12} + E_{12} \cdot E_2 + MC_{12} \cdot M_2 + \\
&+ NU_{12} \cdot N_2 + W_{12} \cdot W_2 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{12}; \\
P_{21} &\geq PC_{21} \cdot M_{21} + E_{21} \cdot E_2 + MC_{21} \cdot M_2 + \\
&+ NU_{21} \cdot N_2 + W_{21} \cdot W_2 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{21}; \\
P_{22} &\geq PC_{22} \cdot M_{22} + E_{22} \cdot E_2 + MC_{22} \cdot M_2 + \\
&+ NU_{22} \cdot N_2 + W_{22} \cdot W_2 + DV_1 \cdot D_1 \cdot M_{22};
\end{aligned}
\tag{5.5}$$

- для варіанту використання технологічного комплексу Н1, постачальника S1 та транспортного підприємства Т2:

$$\begin{aligned}
 P11 &\geq PC11 \cdot M11 + E11 \cdot E1 + MC11 \cdot M1 + \\
 &+ NU11 \cdot N1 + W11 \cdot W1 + DV2 \cdot D1 \cdot M11; \\
 P12 &\geq PC12 \cdot M12 + E12 \cdot E1 + MC12 \cdot M1 + \\
 &+ NU12 \cdot N1 + W12 \cdot W1 + DV2 \cdot D1 \cdot M12; \\
 P21 &\geq PC21 \cdot M21 + E21 \cdot E1 + MC21 \cdot M1 + \\
 &+ NU21 \cdot N1 + W21 \cdot W1 + DV2 \cdot D1 \cdot M21; \\
 P22 &\geq PC22 \cdot M22 + E22 \cdot E1 + MC22 \cdot M1 + \\
 &+ NU22 \cdot N1 + W22 \cdot W1 + DV2 \cdot D1 \cdot M22.
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Гідропонні технологічні комплекси, які синтезуються для виконання замовлення, можуть включати площі та основне обладнання, що належать різним підприємствам регіону. Наприклад, різні види культур одного порядку можуть вирощувати кілька підприємств. Такий підхід дає можливість використання багаторічного досвіду та тих самих ділянок для виробництва незмінних культур, без зміни налаштувань обладнання, комплексів використання поживних речовин і мінералів.

Отже, існує цілком раціональний засіб підвищення ефективності функціонування регіональних гідропонних технологічних комплексів.

Також з метою формування більш оптимальних додаткових варіантів можуть бути залучені різні постачальники та транспортні підприємства, які здійснюватимуть постачання наборів необхідних поживних речовин і мінералів та доставку партій замовлення до споживача. У цьому випадку формули (5.4)–(5.6) необхідно корегувати або внести відповідні виправлення. Все це забезпечує економію часу, енергії та матеріалів, підвищення загальної ефективності виробництва та якості готової продукції, зниження її собівартості.

Отже, кількість варіантів виконання замовлення (варіанти комбінацій обладнання гідропонних технологічних комплексів, постачальників, транспортних компаній) може бути досить великою.

Синтез і аналіз цієї кількості варіантів з урахуванням кількох основних критеріїв можна здійснити лише за допомогою відповідної комп'ютерної

програми [98].

На другому етапі синтезу та аналізу виконується ранжування всіх допустимих варіантів (після їх відбору за умовами (5.1)–(5.6) на основі критеріїв: фактична собівартість продукції при реалізації деякого основного гідропонного технологічного обладнання; залучення деяких постачальників і транспортних компаній – PCA_{ij} і відстань DV_i між основним гідропонним технологічним комплексом (забезпечує основну частину замовлення) і споживачем.

Умови сортування та вибору оптимального варіанту з мінімальними PCA_{ij} і DV_i мають вигляд [98]:

$$PCA_{ij} = PC_{ij} \cdot M_{ij} + E_{ij} \cdot E_i + MC_{ij} \cdot M_i + \\ + NU_{ij} \cdot N_i + W_{ij} \cdot W_i + DV_i \cdot D_i \cdot M_{ij}; \quad (5.7)$$

MINIMUM from: $PCA_{11}, PCA_{12}, \dots, PCA_{mn}$;
MINIMUM from: $DV_1, DV_2, \dots, DV_m$.

Обраний оптимальний варіант виконання замовлення доводиться до реалізації з використанням відповідних потужностей регіональних автоматичних гідропонних комплексів, постачальників і транспортних підприємств.

5.2. Методика розрахунку основних технологічних параметрів процесу роботи гідропонних установок

Технологічні параметри удосконаленої гідропонної установки, яку наведено на рис. 5.1 визначають у такій послідовності.

1. Необхідна потужність електричного двигуна 14 гідропонної установки визначається за формулою [29, 38]:

$$N_{\partial 14} = \frac{Q_n p_n}{\eta_n \eta_{\partial} \eta_m}, \quad (5.8)$$

де Q_n – продуктивність насоса 13, m^3/c ;

p_n – тиск в гідравлічній магістралі насоса 13, Па;

$\eta_n, \eta_{\partial}, \eta_m$ – ККД насоса 13, електричного двигуна 14 і муфти 41.

Продуктивність насоса Q_n можна визначити з урахуванням необхідної максимальної добової витрати q_{16} (м^3) збагаченої суміші для однієї рослини, максимальної кількості k_{16} (шт.) рослин всередині одного барабана 36 і кількості z_6 (шт.) барабанів на валу 19 за формулою:

$$Q_n = \frac{4 \cdot 1,3 \cdot q_{16} \cdot k_{16} \cdot z_6}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{5,2 \cdot q_{16} \cdot k_{16} \cdot z_6}{86,4 \cdot 10^3}. \quad (5.9)$$

Тиск p_n в гідравлічній магістралі насоса 13 можна знайти за допомогою врахування втрат тиску від тертя за довжиною в гідравлічних магістралях 4, 2 і в шлангу 3, а також місцевих втрат тиску (повороти гідравлічних ліній, проходження розгалужень, виходи з гідравлічних ліній в атмосфері).

При цьому використовуємо формулу:

$$\begin{aligned} p_n = & \rho_{m.o} \frac{l_t g_m^2}{2} + [2\zeta_t + \xi_b (n_d - 1)] \rho_{m.o} \frac{g_m^2}{2} + \\ & + 4n_d \lambda_b \rho_{m.o} \frac{l_b g_m^2}{2d_b} + 4n_d [\zeta_t + \xi_b (n_d - 1)] \rho_{m.o} \frac{l_t g_m^2}{2} +, \\ & + 4n_d n_h \lambda_h \rho_{m.o} \frac{l_h g_m^2}{2d_h} + 4n_d n_h \zeta_e \rho_{m.o} \frac{g_m^2}{2} + \rho_{m.o} g H_i \end{aligned} \quad (5.10)$$

або після скорочення:

$$p_n = \rho_{m.o} \frac{g_m^2}{2} \left[\lambda_t \frac{l_t}{d_t} [2\zeta_t + \xi_b (n_d - 1)] + 4n_d \lambda_t \frac{l_t}{d_b} + 4n_d [\zeta_t + \xi_b (n_d - 1)] + \right. \\ \left. + 4n_d n_h \lambda_h \frac{l_h}{d_h} + 4n_d n_h \zeta_e + \frac{2gH_i}{g_m^2} \right], \quad (5.11)$$

де λ_t , λ_b , λ_h – коефіцієнти гідравлічного тертя в магістралях 4, 2 та в шлангу 3;

$\rho_{m.o}$ – щільність використаної в установці поживної суміші з урахуванням вмісту в ній розчиненого повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

l_t , l_b , l_h – довжини гідравлічних ліній 4, 2 і шланга 3, м;

d_t , d_b , d_h – діаметри гідравлічних магістралей 4, 2 і шланга 3, м;

g_m – середня швидкість течії поживної суміші в гідравлічній системі установки, $\text{м}/\text{с}$;

$\zeta_t, \zeta_b, \zeta_e$ – коефіцієнти місцевого гідравлічного опору на повороті лінії, при проходженні розгалуження та на виході зі шлангу в атмосферу;

H_i – загальна максимальна висота підняття поживної суміші до верхнього гідравлічного рядка 2, м.

2. Необхідну встановлену потужність електричного двигуна 11 можна визначити за формулою:

$$N_{\partial 11} = \frac{Q_k p_k}{\eta_k \eta_{\partial} \eta_m}, \quad (5.12)$$

де Q_k – продуктивність компресора 12, м³/с;

p_k – тиск у силовому насосі на магістралі компресора 12, Па;

$\eta_k, \eta_{\partial}, \eta_m$ – коефіцієнти корисної дії компресора 12, електродвигуна 11 і муфти 42.

Продуктивність компресора Q_k можна обчислити з урахуванням максимально необхідного вмісту повітря k_a в збагаченій суміші:

$$Q_k = k_a Q_n. \quad (5.13)$$

Технологічні параметри удосконаленої ланцюгової гідропонної установки, яку наведено на рис. 5.2 визначають у такій послідовності.

1. Необхідну потужність електричного двигуна 15 установки можна визначити за формулою:

$$N_{\partial 14} = \frac{Q_n p_n}{\eta_n \eta_{\partial} \eta_m}, \quad (5.14)$$

де Q_n – продуктивність насоса 33, м³/с;

p_n – тиск в гідравлічній магістралі насоса 33, Па;

$\eta_n, \eta_{\partial}, \eta_m$ – ККД насоса 33, електричного двигуна 15 і муфти 21.

Тиск p_n в гідравлічній магістралі насоса 33 Q_p може розрахувати з урахуванням максимального добового скиду q_{1p} (м³) збагаченої суміші для однієї рослини і максимальної кількості рослин $n_{p.c}$

$$p_n = p_o + \rho_{m.o} q_{1p} n_{p.c} H_n, \quad (5.15)$$

де p_o – тиск на поверхні суміші в резервуарі 32, Па;

H_n – глибина подачі повітря в танк 32, м.

2. Необхідну потужність електричного двигуна 16 установки можна визначити за формулою:

$$N_{16} = M_s \omega_s \eta_{e3} \eta_{m3} \eta_r \eta_{o.t} \eta_b, \quad (5.16)$$

де M_s – момент опору на валу 19, Н м;

ω_s – кутова швидкість обертання вала 19, рад/с;

η_{e3} , η_{m3} , η_r , $\eta_{o.t}$, η_b – коефіцієнти корисної дії електричного двигуна 15, муфти 40, редуктора 17, відкритих шестерень 16, 18 і упорних підшипників 20.

Момент опору M_s на валу 19 можна розрахувати як:

$$M_s = 0,5 J_s \omega_s^2, \quad (5.17)$$

де J_s – момент інерції вала 19 і пов'язаних з ним елементів (кг м), при цьому:

$$J_s = 0,5 (m_s r_s^2 + m_d r_d^2), \quad (5.18)$$

де m_s , m_d – маси вала 19 і барабана 36 з усіма з'єднаними елементами, кг;

r_s , r_d – радіус вала 19 і барабана 36, м.

Технологічні параметри удосконаленої гідропонної установки, яку наведено на рис. 5.2 визначають у такій послідовності.

1. Потрібну подачу кількості повітря Q_p (м³/с) для більш активної взаємодії рослин з повітрям та інтенсифікація процесу всередині однієї системи 12 (рис. 5.2) з кількістю рослин $n_{p.c}$, або тримачів на ланцюгу 26 визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{1,3 p_p n_{p.c} n_p}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{p_p n_{p.c} n_p}{66462}. \quad (5.19)$$

Тиск p_p можна знайти за допомогою формули:

$$p_p = \rho_{m.o} \frac{g_m^2}{2} \left[\lambda_t \frac{l_t}{d_t} + (\zeta_t + \zeta_e) + g \frac{2H_i}{g_m^2} + \frac{2p_{om}}{\rho_{m.o} g_m^2} \right], \quad (5.20)$$

де λ_t – коефіцієнт гідравлічного тертя в магістралі 4;

l_t – довжини гідравлічної лінії 4, м;

d_t – діаметр гідравлічної магістралі 4, м;

$\mathcal{Q}_m$ – середня швидкість течії поживної суміші в гідравлічній системі установки, м/с;

$\zeta_t, \zeta_b, \zeta_e$ – коефіцієнти місцевого гідравлічного опору на повороті лінії 4, при проходженні розгалуження та на виході лінії 4;

H_i – загальна максимальна висота підняття поживної суміші до верхнього гідравлічного рядка 2, м;

p_{om} – надлишковий тиск в середині поживної суміші на виході з гідравлічного трубопроводу 4, Па.

2. Необхідну потужність електричного двигуна 18 установки можна визначити за формулами (5.12)–(5.15), де Q_k – подача компресора 34, м³/с; p_c – тиск у силовому трубопроводі компресора 34, Па; $\eta_c, \eta_{c2}, \eta_{m2}$ – коефіцієнти корисної дії компресора 34, електродвигуна 18 і муфти 20; p_o – тиск на поверхні суміші в резервуарі 19, Па; H_c – глибина подачі повітря в резервуар 19, м.

3. Активний момент, який створюється вагою тримачів 12 і з'єднаних з ними елементами з одного боку ланцюгових коліс 23, 27 врівноважується реактивним моментом, створюваним вагою кожухів з іншої сторони ланцюгових коліс.

Тому при розрахунку необхідної потужності електродвигуна 18 установки ми враховуємо лише момент M_f сил тертя в підшипниках кронштейнів 24, 28:

$$N_{18} = M_f \omega_{cw} \eta_{e3} \eta_{m3} \eta_{wt} \eta_b, \quad (5.21)$$

де ω_{cw} – кутова швидкість ланцюгових коліс 23, 27, рад/с;

$\eta_{e3}, \eta_{m3}, \eta_{wt}, \eta_b$ – коефіцієнти корисної дії електричного двигуна 18,

зчеплень редуктора 17, черв'ячної передачі 29, 22 та підшипників кронштейнів 24, 28.

Момент M_f може визначити як:

$$M_f = 0,5F_1 f_1 d_s, \quad (5.22)$$

де F_1 – навантаження від сили тяжіння тримачів 12 і з'єднаних з ними елементів, що створює момент M_f , Н;

f_1 – коефіцієнт тертя в підшипниках;

d_s – діаметр вала ланцюгових коліс 23, 27, м.

Навантаження F_1 можна знайти за допомогою формули:

$$F_1 = g(m_{ct} + m_c), \quad (5.23)$$

де m_{ct} – маса ланцюгової передачі, включаючи маси валів, ланцюгових коліс, ланцюга, черв'ячного колеса 22, кг;

m_c – маса кожуха з усіма з'єднаними елементами, кг.

Технологічні параметри вдосконаленого апарату контролю подачі живильних речовин для гідропонних установок, який наведено на рис. 5.3 визначають у такій послідовності [84].

Переміщення x дросельної заслінки 4 в залежності від кута повороту φ (град) вала крокового двигуна можна знайти за формулою:

$$x = \varphi \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} t_p, \quad (5.24)$$

де z_1, z_2 – кількість зубів шестерень 13, 12;

z_3, z_4 – величини черв'ячного входу 10 і зубів черв'ячної передачі 9;

t_p – крок стійки 7, м.

Швидкість $\mathcal{G}_o$ (м/с) руху дросельної заслінки можна обчислити як:

$$\mathcal{G}_o = n_o \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} t_p, \quad (5.25)$$

де n_o – лінійна частота обертання вала крокового двигуна, рад/с.

Потім ми можемо визначити зміну запасу поживних речовин ΔQ ($\text{м}^3/\text{с}^2$) відповідно до руху x :

$$\Delta Q = n_o D x g_i, \quad (5.26)$$

де D – діаметр порожнини 19, м;

g_i – середня швидкість поживної речовини в цій порожнині, м/с.

Значення ΔQ також можемо визначити залежно від максимальної подачі поживних речовин $Q_{\max}$ у разі повного відкриття розміру отвору дросельної заслінки (його відповідає номінальній подачі насоса гідропонної установки).

У цьому випадку використовуємо формулу:

$$\Delta Q = \frac{x}{x_{\max}} Q_{\max}, \quad (5.27)$$

де $x_{\max}$ – максимальний розмір отвору дросельної заслінки, м.

Рівняння руху дросельної заслінки 4 при зміні подачі та відносно осі x (див. рис. 5.3) можна представити у вигляді:

$$-m\ddot{x} = F_d - F_p - R; \quad 0 \leq t \leq t_r, \quad (5.28)$$

де m – маса виконавчого елемента дросельної заслінки 4, кг;

F_d – рушійна сила, що впливає на виконавчий елемент 4 від рейки трансмісії (див. нижче), Н;

F_p – сила, що створюється різницею тисків живильного речовини на виконавчий елемент 4, Н;

R – сила тертя в ущільненні 6 дросельної заслінки 4, Н;

t_r – час регулювання розміру отвору дросельної заслінки, с.

Рушійну силу F_d можна знайти за формулою:

$$F_d = M \eta_e \eta_c \eta_w \eta_b^3 \eta_g \eta_r \frac{z_1 z_3}{D_a z_2 z_4}, \quad (5.29)$$

де M – поворотний момент на валу крокового двигуна 14, Н м;

$\eta_e, \eta_c, \eta_b^3, \eta_g, \eta_w, \eta_r$ – коефіцієнти ККД крокового двигуна 14, електромагнітної

муфти 11, шарикопідшипників в приводі (три пари), шестерні 13, 12, черв'ячної передачі 10, 9, рейкової передачі 8, 7 [8, 10];

D_a – розділовий діаметр шестерні 8, м.

Формулу для визначення сили F_p можемо отримати з відомої залежності для визначення номінального запасу поживних речовин:

$$Q_n = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (5.30)$$

де Q_n – номінальний запас поживних речовин, м³/с²;

μ – коефіцієнт подачі на дросель 4;

Δp – різниця тисків, що створює силу F_p , Па;

ρ – щільність поживної речовини, кг/м³.

Отже, з формули (5.30) можна визначити силу F_p

$$F_p = \frac{2Q_n^2}{\pi\mu^2 D^2}, \quad (5.31)$$

Силу R можна визначити, як [11]:

$$R = 0,1F_d. \quad (5.32)$$

5.3 Впровадження результатів досліджень

Результати еспериментальних та теоретичних досліджень щодо розробки структури та алгоритмів роботи автоматизованої системи керування режимними параметрами гідропонної установки впроваджено у навчальний процес у Вінницькому національному аграрному університеті при викладанні навчальних дисциплін «Мехатроніка і мобільна робототехніка» та «Система точного землеробства» (Додаток И).

Виробничі випробування були проведені на базі ПСП «Агрофірма Нападівська» (ЄДРПОУ 32292489, Вінницька обл., Вінницький р.-н., с.

Нападівка, вул. Центральна, 7) (Додаток К). Дослідження проводилося в лабораторних умовах із контрольованим фотоперіодом на гідропонних системах, розділених непроникними для світла перегородками, що запобігали проникненню фотонів у сусідні секції але забезпечували аерацію між ними. У межах кожної секції підтримувалися стабільні мікрокліматичні параметри: температура повітря на рівні 18-20°C, відносна вологість повітря на рівні 60-70 %, концентрація CO₂ не менше 0,03 % та швидкість повітряного потоку в діапазоні 0,3-0,5 м/с. Мінеральне живлення рослин забезпечувалося шляхом подачі стандартних живильних розчинів, склад яких залишався незмінним впродовж випробувань. Періодичний аналіз складу поживного розчину та його корекція здійснювалися для кожної дослідної одиниці. В якості субстрату використовувався агроперліт.

В якості джерел опромінення були використані експериментальні світлодіодні випромінювачі. Заданий спектр випромінювання формувався шляхом регулювання співвідношення інтенсивностей випромінювання синього, зеленого та червоного світлодіодів, а також величини електричного струму, що протікає через них. Впродовж усього періоду вегетації рослин забезпечувалася стабільна інтенсивність опромінення шляхом динамічного коригування висоти розміщення пристроїв, що генерують випромінювання. Отримані результати досліджень емпірично підтвердили технологічну ефективність впровадження модернізованої багатоярусної гідропонної системи в умовах промислового вирощування салату *Lollo Bionda* в тепличних комплексах.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Україна, 22400, Вінницька обл., Хмільницький р.-н., м. Калинівка, вул. Незалежності, 46) отримало конструкторську і технологічну документацію на виготовлення дослідних зразків гідропонних установок для виробничих випробувань і серійного виробництва (Додаток Л).

За результатами виробничих досліджень рекомендовано основні конструктивно-геометричні та технологічні параметри багатоярусної гідропонної установки, які наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані конструктивно-геометричні параметри та технологічні режими процесу вирощування листя салату в багатоярусній гідропонній установці

Найменування	Значення
Конструктивні геометричні (розмірні) параметри:	
– діаметр колеса, м	1,6
– довжина секції, м	3,384
– ширина колеса, м	1,54
– висота секції, м	1,698
– ширина пратформи (лотка), м	0,4
– довжина пратформи (лотка), м	3,05
Технологічні параметри:	
- кількість лотків, шт.;	8
- кількість стаканів у одному лотку, шт.;	45
- кут нахилу лотка при розосередженні насіння, град.;	25...30
- кількість коливань лотка, раз;	3
- доза опромінення, Вт год./м ² ;	300...350
Витрати:	
Розчину за цикл на одну ємність, л	0,3
Електроенергії на 1 секцію за 1 цикл (21 день), кВт	45,3
Продуктивність:	
Середня вага дозрілого салату, кг	0,16-0,18
Середня вага салату з одного лотка, кг	7,2-8,1
Середня вага вирощеного салату з використанням однієї установки за цикл (21 день), кг	57,6-64,8

5.4. Економічна ефективність вирощування сільськогосподарської продукції з використанням багатоярусної гідропонної установки

Фактичну собівартість C_{ϕ} (грн) виробництва гідропонної продукції при застосуванні гідропонних установок можна розрахувати за формулою [193]:

$$C_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\epsilon}}{Q_p}, \quad (5.33)$$

де: $\sum_{i=1}^n E_{\epsilon}$ – сумарні прямі експлуатаційні витрати на виробництво гідропонної

продукції при застосуванні базової та розробленої гідропонної установки, грн.;
 Q_p – кількість гідропонної продукції, вирощеної за 1 рік, кг.

Сумарні прямі експлуатаційні витрати на процес вирощування гідропонної продукції розрахуємо за формулою:

$$\sum_{i=1}^n E_{\epsilon} = Z_{\Pi} + A_{\epsilon} + A_{\Pi p} + B_{\epsilon} + B_{ж.р}, \quad (5.34)$$

де Z_{Π} – витрати на зарплату робітникам, які обслуговують гідропонну установку, грн; A_{ϵ} – амортизаційні відрахування на технологічне обладнання, грн.; $A_{\Pi p}$ – витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування обладнання гідропонної установки, грн; B_{ϵ} – вартість використання електроенергії, грн; $B_{ж.р}$ – вартість використання живильного розчину, грн.

Загальну кількість виробленої гідропонної продукції Q_p за 1 рік визначаємо за формулою:

$$Q_p = W_{\psi} k_{\psi} K_p, \quad (5.35)$$

де W_{ψ} – продуктивність гідропонної установки за 1 цикл, кг.

Або:

- для базової гідропонної установки

$$Q_{p,б} = 54,7 \cdot 15 \cdot 21 = 17230 \text{ кг.}$$

- для розробленої гідропонної установки

$$Q_{p,у} = 61,6 \cdot 15 \cdot 21 = 19904 \text{ кг.}$$

Витрати на зарплату робітникам Z_{Π} , які обслуговують гідропонну установку розраховують за формулою:

$$Z_{\Pi} = \Gamma_o t_p, \quad (5.36)$$

де $\Gamma_o = 50$ грн/год. – годинна оплата праці робітника, який обслуговує гідропонну установку [194]; t_p – загальна тривалість роботи гідропонної установки за 1 рік, год.;

Загальну тривалість роботи гідропонної установки за 1 рік розраховуємо за формулою:

$$t_p = K_p T_{\psi} = 15 \cdot 504 = 7560 \text{ год.}, \quad (5.37)$$

де K_p – кількість робочих циклів за 1 рік; $T_{\text{ц}}$ – середня тривалість одного циклу виробництва гідропонної продукції, год.;

Тоді згідно з (5.36) і (5.37) витрати на заробітну плату робітникам $З_{\text{п}}$, які обслуговують гідропонну установку за 1 рік визначається за формулою:

$$З_{\text{п}} = \Gamma_o K_p T_{\text{ц}}. \quad (5.38)$$

Враховуючи, що обсяг виконуваних робіт при використанні базової та розробленої конструкції ідентичний, то згідно з (5.38) витрати на заробітну плату робітникам $З_{\text{п}}$, які обслуговують гідропонну установку за 1 рік становлять:

$$З_{\text{п.б}} = З_{\text{п.у}} = 50 \cdot 7560 = 378\,000 \text{ грн.};$$

Витрати на амортизацію $A_{\text{е}}$ обладнання гідропонної установки розраховуємо за формулою:

$$A_{\text{е}} = \frac{B_{\text{м}} \cdot a}{100}, \quad (5.39)$$

де $B_{\text{м}}$ – балансова вартість гідропонної установки, грн; $a = 14...16\%$ – коефіцієнт амортизаційних відрахувань [195].

Балансова вартість комплексу базових гідропонних установок $B_{\text{м.б}} = 1291500$ грн, розроблених гідропонних установок – $B_{\text{м.у}} = 945000$ грн.

Тоді згідно з (5.39) витрати складуть:

- для базового варіанту

$$A_{\text{е.б}} = \frac{1291500 \cdot 15}{100} = 193725 \text{ грн.};$$

- для запропонованого варіанту

$$A_{\text{е.у}} = \frac{945000 \cdot 15}{100} = 141750 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування $A_{\text{пр}}$ згідно з даними [196] становлять 18-21% від балансової вартості гідропонних установок.

Приймаємо витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування для базового і запропонованого варіантів $A_{\text{пр}} = 20\%$.

Тоді витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування $A_{Пр}$ визначаються за формулою:

$$A_{Пр} = 0,2B_m. \quad (5.40)$$

Або:

- для базового

$$A_{Пр.б} = 0,2 \cdot 1291500 = 258\,300 \text{ грн.};$$

- для розробленого

$$A_{Пр.у} = 0,2 \cdot 945000 = 189\,000 \text{ грн.}$$

Вартість використання електроенергії B_e в процесі виробництва гідропонної продукції за 1 рік розраховуємо за формулою:

$$B_e = t_p \sum N_e C_e K_e, \quad (5.41)$$

де $\sum N_e$ – сумарна встановлена потужність електроприводів комплексу гідропонних установок, кВт; $C_e = 686,32$ грн за 1 МВт год – ціна використаної електроенергії [197]; $K_e = 1,1 \dots 1,24$ – коефіцієнт, що враховує можливі перевитрати в споживанні електроенергії [198]. Приймаємо $K_e = 1,15$.

Тоді згідно з (5.41) вартість використання електроенергії B_e в процесі виробництва гідропонної продукції за 1 рік становлять:

- для базового варіанту

$$B_{e.б} = 7560 \cdot 0.049 \cdot 686.32 \cdot 1.15 = 293\,944 \text{ грн};$$

- для запропонованого варіанту

$$B_{e.у} = 7560 \cdot 0.027 \cdot 686.32 \cdot 1.15 = 161\,105 \text{ грн.}$$

Вартість використання живильного розчину $B_{ж.р}$ складається з суми вартості витраченої води B_v та вартості живильних матеріалів $B_{ж.м}$

$$B_{ж.р} = B_v + B_{ж.м}. \quad (5.42)$$

При цьому:

- вартість витраченої води B_v розраховуємо за формулою

$$B_v = Q_{p.в} C_v, \quad (5.41)$$

де: $Q_{p.в}$ – річна потреба води на виробництво гідропонної продукції за 1 рік, кг;
 $Ц_{в} = 65,4$ грн за 1000 л – вартість використання води [199];

- вартість живильних матеріалів $B_{ж.р}$ розраховуємо за формулою

$$B_{ж.м} = Q_{p.ж.м} Ц_{ж.м}, \quad (5.42)$$

де: $Q_{p.ж.м}$ – річна потреба у живильних матеріалах на виробництво гідропонної продукції, л; $Ц_{ж.м} = 65,4$ грн за 1 кг – вартість одиниці живильних матеріалів [200].

Річну потребу води на виробництво гідропонної продукції за 1 рік можна визначити за формулою:

$$Q_{p.в} = Q_p B_{1в}, \quad (5.43)$$

де $B_{1в}$ – витрати води на вирощування 1 т продукції, л.

Річну потребу живильних матеріалів на виробництво гідропонної продукції за 1 рік можна визначити за формулою:

$$Q_{p.ж.м} = Q_p B_{1ж.м}, \quad (5.44)$$

де $B_{1ж.м}$ – витрати живильних матеріалів на вирощування 1 т продукції, л.

Тоді вартість використання живильного розчину $B_{ж.р}$ згідно з (5.42)-(5.44) визначається за формулою:

$$B_{ж.р} = Q_p (B_{1в} Ц_{в} + B_{1ж.м} Ц_{ж.м}). \quad (5.45)$$

Або:

- для базового варіанту

$$n_{ж.р.б} = 0.7 \cdot 45 \cdot 6 \cdot 15 \cdot 21 = 59535 \text{ л.}$$

$$B_{ж.р.б} = \frac{59535 \cdot 2300}{5000} = 27386 \text{ грн.}$$

- для розробленого варіанту

$$n_{ж.р.у} = 0.3 \cdot 45 \cdot 8 \cdot 15 \cdot 21 = 34020 \text{ л.}$$

$$B_{ж.р.у} = \frac{34020 \cdot 2300}{5000} = 15649 \text{ грн.}$$

Тоді сумарні прямі експлуатаційні витрати $\sum_{i=1}^n E_{\epsilon}$ згідно з (5.34) для процесу вирощування гідропонної продукції становлять:

- для базового варіанта

$$\sum_{i=1}^n E_{\epsilon, \delta} = 378000 + 193725 + 258300 + 293944 + 27386 = 1\,151\,355, \text{ грн};$$

- для розробленого варіанта

$$\sum_{i=1}^n E_{\epsilon, \gamma} = 378000 + 141750 + 189000 + 161105 + 15649 = 885\,504 \text{ грн.}$$

Очікуваний річний економічний ефект E_e від застосування комплексу розробленого гідропонного обладнання при вирощуванні гідропонної продукції визначається за формулою:

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{\epsilon, \delta} - \sum_{i=1}^n E_{\epsilon, \gamma} + D. \quad (5.46)$$

Де D – вартість додатково одержаної продукції за рахунок збільшення продуктивності, грн.

$$D = (Q_{p, \gamma} - Q_{p, \delta}) \cdot B_{c.p.} \quad (5.47)$$

$B_{c.p.}$ – середнорічна вартість листя салату на ринку, грн/кг.

$$D = (19904 - 17230) \cdot 180 = 481320 \text{ грн.}$$

Тоді:

$$E_p = 1\,151\,355 - 885\,504 + 481320 = 747171 \text{ грн.}$$

Термін окупності використання комплексу розроблених гідропонних установок:

$$T = \frac{\sum E_{\epsilon}}{P_n} = \frac{885504}{747171} = 1,2, \quad (5.47)$$

або $T = 1,2$ роки.

Показники економічної ефективності застосування комплексу розроблених конструкцій гідропонних установок для вирощування салату в теплиці наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Показники ефективності використання розробленої багаторушної гідропонної установки

Показники ефективності	Показники	
	Базовий варіант	Розроблений варіант
Продуктивність однієї секції гідропонної установки за 1 цикл (21 день), кг	54,7	61,6
Кількість виробленої продукції за 1 рік (320 днів), кг	17230	19904
Балансова вартість, грн	1291500	945000
Кількість обслуговуючого персоналу, чол	3	3
Витрати на заробітну плату робітникам, грн	378 000	378 000
Амортизаційні відрахування, грн.	193725	141750
Витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування, грн	258 300	189000
Використана електроенергія кВт	37160	20900
Вартість використання електроенергії (Тариф 6.9 грн./кВт), грн	293944	161105
Вартість використання живильного розчину, грн	27386	15649
Сумарні прямі експлуатаційні витрати, грн	2 301 833	2 157 583
Очікуваний річний економічний ефект, грн.		747171
Термін окупності, років		1,2

5.4. Висновки до розділу

5.4.1. Для реалізації високоефективної комплексної автоматизації гідропонного технологічного обладнання розроблено структурну схему автоматизованого регіонального гідропонного виробничо-логістичного об'єднання та блок-схему алгоритму автоматичного синтезу та аналізу варіантів його функціонування.

5.4.2. Запропоновано подальші шляхи удосконалення гідропонних установок, отримано залежності та рівняння для визначення основних параметрів їх параметрів:

- переміщення та швидкості виконавчого елемента в процесі регулювання;
- зміни надходження поживних речовин;

- навантаження на виконавчий елемент.

5.4.3. Розроблені залежності можуть бути використані для створення методики проєктного розрахунку автоматичного високоефективного регулюючого обладнання для оптимального постачання поживними речовинами гідропонних установок.

5.4.4. Річний економічний ефект від впровадження комплексу гідропонних установок розробленої конструкції в умовах виробництва становить 747171 грн. за терміну окупності 1,2 роки.

Основні результати розділу опубліковано в працях [29, 38, 84, 98, 190, 191, 192].

1. Севостьянов І.В., Мельник О.С. Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 119–128. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-13.

2. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration of improved hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 66–75. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-7.

3. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 61-67. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-7.

4. Sevostianov I., Melnyk O. Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2(105). С. 76–83. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-8.

5. Мельник О.С. Дослідження розробленого апарату управління гідропонними установками : тези доп. VI-та наук.-практична конф. «Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України. Київ, 25-26 вересня 2024 р. С. 15–17.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення технологічної ефективності вирощування рослин гідропонним методом шляхом розробки конструкції та обґрунтування параметрів і режимів роботи багатоярусної гідропонної установки.

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для гідропонного вирощування аграрної продукції розроблено конструкцію багатоярусної гідропонної установки, яка характеризується значно меншими непродуктивними витратами поживного розчину порівняно із базовими конструкціями гідропонних установок, а також мінімізацією експлуатаційних витрат за рахунок відсутності спеціальних пристроїв для поливу вирощуваних рослин.

2. На основі теоретичного аналізу розроблено математичні моделі, які описують динаміку масообміну в субстраті при крапельному живленні рослин мінеральним розчином з урахуванням здатності випаровування листової частини рослини. З використанням отриманих математичних моделей розроблено структурні схеми живлення рослин з контурами концентрації живильного розчину та сонячного опромінення рослин, які регламентують процес автоматичного керування подачі та споживання живильних речовин рослинам закритого ґрунту.

3. На основі дослідження технічної системи «сипуче середовище–лоток», отримано математичну модель, яка функціонально описує зміну коефіцієнта заповнення площі прямокутного лотка посівним матеріалом залежно від кута нахилу та кількості коливань лотка. Встановлено, що теоретичне значення коефіцієнта заповнення площі лотка змінюється в межах від 0,1 до 1,27 за зміни кута нахилу лотка від 0,262 рад (15 град.) до 0,785 рад (45 град.) та кількості коливань лотка 1, 2, 3, 4 рази. За кількості коливань лотка рівному 3 рази значення коефіцієнта заповнення площі лотка знаходиться в межах від 0,7 до 0,9 за зміни кута нахилу лотка від 15 до 45 град.

4. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що за зміни часу опромінення та інтенсивності опромінення рослин, відповідно, в діапазоні від 8 до 24 год. та від 10 до 30 Вт/м² площа листкової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази, а за зміни інтенсивності опромінення рослин в діапазоні від 10 до 30 Вт/м² маса листя рослин салату збільшується приблизно в 3,6...3,9 рази. Значне збільшення площі листкової поверхні рослин салату (майже в 1,6 рази – від 500 до 850 см²) спостерігається за дози опромінення, яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення від 480 до 720 Вт год./м² приріст площі листкової поверхні рослин салату незначний – в середньому на 40...50 см². Експериментально встановлено, що за зміни кута нахилу лотка в діапазоні від 10 до 30 град. та кількості коливань лотка в діапазоні від 1 до 5 раз, коефіцієнт заповнення площі лотка насінням сочевиці збільшується в середньому в 1,2...1,5 рази. Функціональна зміна вологості насіння w_s в межах збільшення від 14 до 18% призводить до зменшення коефіцієнта заповнення k_{ze} площі лотка насінням сочевиці, але суттєво не впливає на зміну значення коефіцієнта заповнення k_{ze} . При цьому за кількості коливань лотка $n_l = 3$ і 4 рази різниця значень k_z і k_{ze} незначна та становить у середньому 5...10 %.

5. Для досягнення високоефективної комплексної автоматизації гідропонного технологічного обладнання було розроблено структурну модель автоматизованого регіонального гідропонного виробничо-логістичного об'єднання та блок-схему алгоритму автоматизованого синтезу й аналізу варіантів його функціонування. Запропоновано перспективні напрями удосконалення гідропонних систем і розроблено методологію розрахунку ключових параметрів запропонованих гідропонних установок, представлену у формі математичних залежностей.

6. Річний економічний ефект від впровадження комплексу багатоярусних гідропонних установок в умовах виробництва становить 747171 грн. за терміну окупності 1,2 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods / G. Barbosa et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12, no. 6. P. 6879–6891. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
2. Гіль Л.С., Пашковський А.І., Суліма Л.Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту : навч. пос. Вінниця : Нова Книга, 2008. 368 с.
3. Севостьянов І.В. Процеси та обладнання для вібродувного фільтрування вологих дисперсійних середовищ : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2021. 184 с.
4. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers / E. Ritter et al. *Potato Research*. 2001. Vol. 44, no. 2. P. 127–135. URL: <https://doi.org/10.1007/bf02410099> .
5. Севостьянов І.В. Технологія та обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2020. 303 с. ISBN 978-617-7789-16-0
6. Барановський В.М., Борецька Т.Ю., Ярощук Р.О. Інтеграція iot (internet of things) в гідропонні системи. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 120-126. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-14>
7. Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Севостьянов І.В. Процеси та машини вібраційних та віброударних технологій : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 171 с.
8. Niu G., Masabni J. Hydroponics. *Plant Factory Basics, Applications and Advances*. 2022. P. 153–166. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85152-7.00023-9> .
9. Стаднік М.І., Бурлака С.А., Луц П.М. Експериментальне дослідження взаємодії водного та поживного балансу в замкнених гідропонічних системах. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 15-23. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-4-2>

10. Mashumah S., Rivai M., Irfansyah A. N. Nutrient Film Technique based Hydroponic System Using Fuzzy Logic Control. *2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Bali, Indonesia, 30–31 August 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/isitia.2018.8711201>

11. Erfianto B., Rakhmatsyah A., Ariyanto E. Micro-Climate Control for Hydroponics in Greenhouses. *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, Yogyakarta, Indonesia, 24–26 June 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icoict49345.2020.9166237> .

12. Hydroponic Systems for Backyard Greenhouses. *Hydroponics for the Home Grower*. 2015. P. 195–206. URL: <https://doi.org/10.1201/b18069-26> .

13. Стаднік М.І., Бабин І.А., Луц П.М., Ріпа С.В. Аналіз теоретичних досліджень пристроїв дозування та змішування живильних розчинів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 90-96. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-11>

14. Frequently asked questions. *2011 IEEE International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW)*, Hannover, Germany, 11–16 April 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/icdew.2011.5767622> .

15. Переваги та методи вирощування рослин на гідропоніці. *Садовий журнал "Сад та Город"*. URL: <https://sadgorod.in.ua/gorod/perevagi-ta-metodi-viroshchuvannya-roslin-na-gidroponici/> (дата звернення: 08.04.2025).

16. Гідропоніка [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://floragrowing.com/uk/encyclopedia/gydroponyka> (дата звернення: 08.07.2024).

17. Що таке гідропоніка [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.agroputnik.net/scho-takehidroponika/> (дата звернення: 17.07.2024).

18. Які є гідропонні системи. Головна - Floragrow.html. *Floragrow.html*. URL: <http://floragrow.ru/gidroponika/gidroponnyesistemy.html> (дата звернення: 18.07.2024).

19. Синявський О.Ю., Савченко В.В. Автоматичне керування мінеральним живленням рослин у гідропонних теплицях : монографія. Київ :

ЦП "Компринт", 2016. 249 с.

20. Серьогін В.К. Ефективність виробництва продукції рослинництва як фактор забезпечення продовольчої безпеки країни. *Науково-виробничий журнал "Бізнес-навігатор"*. 2014. № 1. С. 99–103.

21. Огляд методів гідропоніки. URL: <https://www.gidroponika.su/gidroponikateorija.html/gidroponika-obzor-osnovnyh-metodovgidroponiki.html> (дата звернення: 28.07.2024).

22. Бабин І., Луц П., Ріпа С. Технології внесення добрив у сучасних тепличних господарствах. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 5 (341). С. 290-295. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-39>.

23. Бурлака С., Луц П., Купчук І. Оцінка продуктивності та енерговитрат у гідропоніці. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Том. 2 № 2 (333). С. 290-295. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-46>.

24. Pedersen T. HTTPS, Secure HTTPS. *Encyclopedia of Cryptography and Security* / ed. by H. C. A. Tilborg. New York, NY, 2005. P. 268–269. URL: https://doi.org/10.1007/0-387-23483-7_189.

25. Shankaraswamy J. Bio Dynamic Farming: A Future Agriculture Farming. *Advances in Plants & Agriculture Research*. 2017. Vol. 6, no. 2. URL: <https://doi.org/10.15406/apar.2017.06.00209>.

26. Веселовська Н.Р., Луц П.М. Переваги використання гідропонних установок циліндричної форми з автоматизованим процесом вирощування. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 62-71. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-2-8>.

27. Stadnik M., Burlaka S., Luts P., Kytsenko A. Integration of sensor technologies into the structural scheme of automated greenhouse control. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (113). С. 119-126. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-13>.

28. "Nature Sweet switches varieties in old EuroFresh greenhouses". Archived

from the original on April 7, 2018. Retrieved Apr 6, 2018.

29. Калетнік Г.М., Соколенко О.М. Інженерні проблеми виробництва гвдропонного зеленого корму. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2010. Вип. 144. Ч. 3. С. 15–25.

30. Севостьянов І.В., Мельник О.С. Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 119–128.

31. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes in the agricultural industry. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, No. 1, pp. 95–104.

32. Книжка Т. С. Фотоактивація живильних розчинів у гідропонних теплицях : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2013. 22 с.

33. Каленська С.М., Єрмакова Л.М., Паламарчук В.Д., Поліщук І.С., Поліщук М.П. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві: Підручник. Вінниця: ФОП Рогальська І.О. 2015. 448 с.

34. Мазур В.А., Гончарук І.В., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Телекало Н.В., Купчук І.М. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур. Вінниця : Нілан-ЛТД. 180 с.

35. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Горобей В.П. Актуальні аспекти розвитку механізації дослідних робіт в рослинництві. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 10. С. 5–12.

36. Beverly R. B. A Simple Tractor Mount for a Vegetable Plot Seeder. *HortScience*. 1987. Vol. 22, №. 5. P. 955. URL: <https://doi.org/10.21273/hortsci.22.5.955> .

37. Kobets A.S., Naumenko M.M., Ponomarenko N.O., Kharytonov M.M., Velychko O.P., Yaropud V.M. Design substantiation of a three-tier centrifugal-type mineral fertilizers spreader. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 53, No. 3, pp. 13–20.

38. Food security as long-term goals of strategic agricultural development / V. Chiritescu et al. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 2014. Vol. 71, no. 1. P. 26–31.

URL: <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:9607>

39. . Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration of improved hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 66–75. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-7>.

40. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 3. С. 6–12.

41. Яропуд В. М., Твердохліб І. В., Спірін А. В. Машины та обладнання і їх використання в рослинництві : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2020. 401 с.

42. Солоня О.В. Застосування сучасних мехатронних систем та роботизованих комплексів у АПК України. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 3 (110). С. 71–76. URL: <https://doi.org/10.37128/10.37128/2520-6168-2020-3-7>.

43. Sevostianov I., Kravets S., Pidlypna M. Use of criterial synthesis and analysis for modernization of objects of machine building production. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2020. Vol. 2 (109). P. 88–96. URL: <https://doi.org/10.37128/10.37128/2520-6168-2020-2-9>.

44. Sevostianov I., Pidlypna M. Model of optimization of functioning of modern polygraphic and publishing complexes. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2020. Vol. 4 (111). P. 90–99. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-10>

45. Greenhouse climate modelling and robust control / N. Bennis et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008. Vol. 61, №. 2. P. 96–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.014> .

46. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds / P. J. M. Van Beveren et al. *Applied Energy*. 2015. Vol. 159. P. 509–519. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.012> .

47. Van Straten G., Challa H., Buwalda F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2000. Vol. 26, №. 3. P. 221–238. URL: [https://doi.org/10.1016/s0168-1699\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/s0168-1699(00)00077-6) .

48. Introduction to Optimal Control of Greenhouse Climate. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. 2010. P. 15–24. URL: <https://doi.org/10.1201/b10321-3> .

49. Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth / F. Rodríguez et al. Springer, 2016. 280 p.
50. Калетнік Г.М., Черниш О.М., Березовий М.Г. Використання сучасних методів механіки для сільського господарства. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. Т1 (65). С. 8–18.
51. Стаднік М.І. Оптимізація функціональної структури системи автоматизації однорідних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 3. С. 62–65.
52. Blooming Business: How Consumer Satisfaction Shapes Online Plant and Cut Flower Spending / A. L. Rihn et al. *HortTechnology*. 2024. Vol. 34, no. 4. P. 481–484. URL: <https://doi.org/10.21273/horttech05427-24>.
53. Kovalov M. M. The efficiency of growing arugula in hydroponic film greenhouses. *Interagency thematic scientific collection «Irrigated agriculture»*. 2022. No. 77. P. 53–57. URL: <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2022.77.12>.
54. Ковальов М.М., Звездун О.М. Вирощування найпоширеніших сортів салату ромен на різних типах субстратів в NTF системах. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. Вип. №1. С. 27–36.
55. Intelligent Robotic Systems. *Mechatronics*. 2015. P. 310–335. URL: <https://doi.org/10.1201/b19009-14>.
56. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Іванишин В.В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 8–14.
57. Учасники проектів Вікіпедія. Arduino – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Arduino> (дата звернення: 08.04.2024).
58. Arduino. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.arduino.cc>. (дата звернення: 08.04.2024).
59. Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance / G. Klempner et al. Wiley & Sons, Limited, John, 2020. 672 p.
60. Hughes A. Electric Motors & Drives. 3rd ed. Newnes, 2005. 410 p.
61. Simulation of Greenhouse Management in the Subtropics, Part I: Model

Validation and Scenario Study for the Winter Season / W. Luo et al. *Biosystems Engineering*. 2005. Vol. 90, №. 3. P. 307–318. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.008>.

62. Carlini M., Castellucci S. Modelling and Simulation for Energy Production Parametric Dependence in Greenhouses. *Mathematical Problems in Engineering*. 2010. Vol. 2010. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1155/2010/590943>.

63. He F., Ma C. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 71. P. 19–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.011>.

64. Nebbali R., Roy J. C., Boulard T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 43. P. 111–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.003>.

65. Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink / M. Kıyan et al. *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 72. P. 147–155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.036>.

66. Guo J., Liu Y., Lü E. Numerical Simulation of Temperature Decrease in Greenhouses with Summer Water-Sprinkling Roof. *Energies*. 2019. Vol. 12, №. 12. P. 2435. URL: <https://doi.org/10.3390/en12122435>.

67. Gliński J., Stępniewski W. Soil Air and Plant Response. *Soil Aeration and Its Role for Plants*. 2018. P. 137–171. URL: <https://doi.org/10.1201/9781351076685-6>.

68. Сич З.Д., Сич І.М. Гармонія овочевої краси та користі. Київ : Арістей, 2005. 192 с.

69. Kovalov M. M., Vasylykowska K. V., Moroz S. M. Growing roses in hydroponic film greenhouses. *Water bioresources and aquaculture*. 2022. No. 2. P. 44–56. URL: <https://doi.org/10.32851/wba.2022.2.2>.

70. Barker A. V. Hydroponics. *Science and Technology of Organic Farming*. 2nd ed. Second edition. | Boca Raton, FL : CRC Press, 2021., 2021. P. 215–233. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003093725-15-15>.

71. Слепцов Ю.В., Федосій І.О. Органічне овочівництво. в 2 ч. Вінниця : Нілан-ЛТД, 2016–2017.
72. Hydroponics. *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual, Second Edition*. 2012. P. 189–208. URL: <https://doi.org/10.1201/b11577-30> .
73. Hydroponics S. (. P. W. A.). Hydroponics--a balanced view: Proceedings of Hydroponics Seminar '83, Perth, Western Australia, 12th February, 1983. Subiaco, WA, Australia : Cornucopia Press, 1983. 67 p.
74. Resh H. M. Hydroponic food production: A definitive guidebook of soilless food-growing methods. 5th ed. Santa Barbara, Calif : Woodbridge Press Pub. Co., 1995. 527 p.
75. Smith J. Hydroponics: A Practical guide for the Soilless Grower. *HortTechnology*. 2005. Vol. 15, no. 3. P. 731. URL: <https://doi.org/10.21273/horttech.15.3.0731> .
76. J. U. Hydroponics and Environmental Clean-Up. *Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. 2012. URL: <https://doi.org/10.5772/36233> .
77. Horticultural, Hydroponic and Soilless-Culture Societies. *Hydroponic Food Production*. 2012. P. 475. URL: <https://doi.org/10.1201/b12500-16> .
78. Drewry P. L. Hydroponic Garden: Gardening Hydroponic For Beginners. Phyllis L. Drewry, 2021. 94 p.
79. YaraTera - комплексні водорозчинні добрива | Yara Україна. *Yara Україна*. URL: <https://www.yara.ua/products/yaratera/> (дата звернення: 09.04.2025).
80. Growing Plants in Water through Hydroponic System / K. J. Dellosa et al. *International Journal of Agriculture and Animal Production*. 2024. No. 43. P. 45–56. URL: <https://doi.org/10.55529/ijaap.43.45.56> .
81. Gurley T. W. Aeroponics: Growing Vertical. Taylor & Francis Group, 2020. 280 p.
82. Все про вирощуванні мікрозелені | Агро Сіті. *Агро Сіті*. URL: <https://agrocitiy.ua/uk/microgreen-uk/> (дата звернення: 09.09.2024).

83. Гідропоніка. Статті компанії «FloraGrowing». *Магазин FloraGrowing Shop - Проушон №1 в Україні*. URL: <https://shop.floragrowing.com/ua/a360402-gidroponika.html> (дата звернення: 09.09.2024).

84. Севостьянов І.В. Теорія технічних систем. Вінниця : ВНАУ, 2014. 342 с.

85. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 61-67. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-1-7>.

86. Булгаков В. М., Пилипака С. Ф., Яропуд В. М., Захарова Т. Н, Калетнік Г. М. Плоскі вертикальні криві, що забезпечують постійні тиск і швидкість руху матеріальної точки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014 р. Вип. 1 (73). С. 5–10.

87. Navulur S., S. C. S. Sastry A., N. Giri Prasad M. Agricultural Management through Wireless Sensors and Internet of Things. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2017. Vol. 7, no. 6. P. 3492. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499> .

88. Cunningham J. A., Whalley J. Internet of Things Entrepreneurial Ecosystems: Challenges and Opportunities. Springer International Publishing AG, 2021. 144 p.

89. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of Plasticity for Pre-Deformed Billet. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 110–120. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.291.110> .

90. Morgan L. Substrate-based Hydroponic Systems. *Hydroponics and protected cultivation: a practical guide*. Wallingford, 2021. P. 77–99. URL: <https://doi.org/10.1079/9781789244830.0077>.

91. Advancements in Hydroponic Systems: A Comprehensive Review / U. Thapa et al. *Archives of Current Research International*. 2024. Vol. 24, no. 11. P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i11973>.

92. Agaricus bisporus mushroom cultivation in hydroponic systems / M. A. Bechara et al. *Transactions of the ASABE*. 2006. Vol. 49, no. 3. P. 825–832. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.20466> .

93. Systems of Hydroponic Culture. *Hydroponics*. 2004. P. 123–151.
URL: <https://doi.org/10.1201/9780849331671.ch9> .
94. Graff H. Control engineering: Automatic regulation engineering. Leipzig : Edition Leipzig, 1973. 172 p.
95. Mathematical Modeling of Technological Processes / ed. by N. Danaev, Y. Shokin, A.-Z. Darkhan. Cham : Springer International Publishing, 2015.
URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25058-8> .
96. Palani S. Automatic Control Systems. Cham : Springer International Publishing, 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93445-3> .
97. Freeman E. A., Aizerman M. A. Theory of Automatic Control: Adiwes International Series. Elsevier Science & Technology Books, 2016. 532 p.
98. Projection. *Encyclopedia of Systems Biology*. New York, NY, 2013. P. 1757. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_101215
99. Sevostianov I., Melnyk O. Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2(105). С. 76–83. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-2-8>
100. Automated Hydroponic Farm System / T. Arun Naik et al. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. 2024. P. 2406–2412. URL: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24may1685> .
101. Lee S., Kim Y. C. Water Treatment for Closed Hydroponic Systems. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2019. Vol. 41, no. 9. P. 501–513. URL: <https://doi.org/10.4491/ksee.2019.41.9.501> .
102. Schwarz D., Gross W. Algae affecting lettuce growth in hydroponic systems. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2004. Vol. 79, no. 4. P. 554–559. URL: <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511804> .
103. Ojala J. C., Jarrell W. M. Hydroponic sand culture systems for mycorrhizal research. *Plant and Soil*. 1980. Vol. 57, no. 2-3. P. 297–303. URL: <https://doi.org/10.1007/bf02211688> .
104. Safvan M. Hydroponic Trough Systems for Maximising Cucumber Production. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. Vol. 12, no. 1. P. 1626–1633. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.58243> .

105. Arun Maurya et al., A. M. e. a. ., Study of Hydroponic Systems and their Variations. *International Journal of Agricultural Science and Research*. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 547–556. URL: <https://doi.org/10.24247/ijasroct201764> .

106. Modu F., Aliyu F., Mabu A. A Survey of Smart Hydroponic Systems. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. Vol. 5, no. 1. P. 233–248. URL: <https://doi.org/10.25046/aj050130> .

107. Spinu V. C., Langhans R. W., Albright L. D. Electrochemical pH control in hydroponic systems. *Acta Horticulturae*. 1998. No. 456. P. 275–282. URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.1998.456.32> .

108. Coosemans J. Control of algae in hydroponic systems. *Acta Horticulturae*. 1995. No. 382. P. 263–268. URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.1995.382.30> .

109. Tüzel I. H., Meric K. M., Tüzel Y. Crop coefficients in simplified hydroponic systems. *Acta Horticulturae*. 2006. No. 719. P. 551–556. URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2006.719.64>.

110. Fageria V. D. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 2001. Vol. 24, no. 8. P. 1269–1290. URL: <https://doi.org/10.1081/pln-100106981> .

111. Пастушенко В.Й., Стеценко А.М. Автоматизована система керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2009. № 147. С.46–52.

112. Ковальов М.М., Васильковська К.В. Вплив сольового складу поживного розчину на вирощування різних сортів салату ромен в гідропонних колонах. *Сучасний стан науки в сільському господарстві та природокористуванні: теорія і практика*. 2020. С. 83–86.

113. Савченко В.М., Міненко С.В., Махов О.А. Формальні моделі для регулювання мікроклімату в теплицях. Матеріали міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, 16 березня 2013. Тернопіль : Крок, 2013. С. 87–89.

114. Савченко В.М., Міненко С.В., Махов О.А. Стратегії контролю процесами мікроклімату в індустріальних теплицях. *Підвищення надійності машин і обладнання* : зб. тез доп. 7 Всеукр. наук.-практ. конф. студ.в та асп.,

Кіровоград : 2013. С. 48–50.

115. Schröder F. G. Alternative vegetables grown in hydroponic systems. *Acta Horticulturae*. 1999. No. 481. P. 213–220.

URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.1999.481.22> .

116. Adams P. Hydroponic systems for winter vegetables. *Acta Horticulturae*. 1991. No. 287. P. 181–190. URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.1991.287.18> .

117. Барбоза Г., Гаделья Ф., Кублик Н., Проктор А., Райхельм Л., Вайссінджер Е., Воллеб Г., Халден Р., Барбоза Г.Л. "Порівняння потреб у землі, воді та енергії салату, вирощеного за допомогою гідропоніки, та звичайних сільськогосподарських методів". *Міжнародний J. Environment. Рез. Охорона здоров'я*. 2015. № 12 (6). С. 6879–6891.

118. Waller P., Yitayew M. Hydroponic Irrigation Systems. *Irrigation and Drainage Engineering*. Cham, 2016. P. 369–386. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05699-9_21 .

119. Glaspie N. Hydroponic Gardening Guide : DIY Hydroponic Systems for Your Garden: Homemade Hydroponic System. Independently Published, 2022.

120. Inglese G. Design and hydroponic systems. *Base Diseño e Innovación*. 2024. Vol. 8, no. 9. P. 85–96. URL: <https://doi.org/10.52611/bdi.num9.2023.941>.

121. Linker R., Seginer I. Greenhouse temperature modeling: a comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2004. Vol. 65, no. 1-2. P. 19–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2003.09.004> .

122. Coelho J. P., de Moura Oliveira P. B., Cunha J. B. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005. Vol. 49, no. 3. P. 330–344. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.08.003> .

123. Міненко С.В., Савченко В.М., Крот В.В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустриальних теплицях. *Вісник Житомирського НАЕУ*. 2016. № 1 (53). Т.1. С. 270–275.

124. Patil S. L., Tantau H. J., Salokhe V. M. Modelling of tropical greenhouse

temperature by auto regressive and neural network models. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 99, no. 3. P. 423–431. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.009>.

125. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Спольнік О.І., Замрій М.А. Вільні коливання осцилятора за наявності квадратичного в'язкого опору та сухого тертя. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2(97). С. 33–40. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2020-2-4>.

126. Hydroponic Systems for Superior Tomatoes. *Hydroponic Tomatoes*. 2016. P. 15–84. URL: <https://doi.org/10.1201/9781466528185-7>.

127. Son J. E., Kim H. J., Ahn T. I. Hydroponic Systems. *Plant Factory*. 2016. P. 213–221. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801775-3.00017-2>.

128. Sevostianov I., Tokarchuk O., Pidlypna M. Automated technological projection of classification processes of dry dispersive materials. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2021. Vol. 2 (113). P. 15–21. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-7>

129. Hydroponic Technologies / C. Maucieri et al. *Aquaponics Food Production Systems*. Cham, 2019. P. 77–110. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4.

130. Geilfus C.-M. Hydroponic Systems in Horticulture. *Controlled Environment Horticulture*. Cham, 2019. P. 35–40. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23197-2_4.

131. Возняк О.М., Солоня О.В., Замрій М.А., Тихонова С.В. ШІМ-керування електроприводом у мехатронних модулях за принципом просторово-векторної модуляції. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 53–61. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-2-7>

132. Пришляк В.М., Соколенко О.М. Результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу розподілу посівного матеріалу по вегетаційній поверхні лотка гідропонної установки. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2013. Вип. 98. Т. 1. С. 213–221.

133. Купчук І.М., Мельник О.С. Математичне моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослинної продукції в

гідропонній установці. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 21–32. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-14>

134. Ковальов М.М. Вирощування огірка Козіма F1 на різних типах субстратів у гідропонних купольних теплицях. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 117. С. 80–89. URL: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.117.11>

135. Лавренко С.О., Безручко Н.В. Аеропонічні системи в сучасному світі. *Збірник наукових праць ДВНЗ «ХДАУ»*. 2019. Вип. 33. С. 205–207.

136. Ковальов М., Михайлова Д. Вплив типу субстрату на вирощування мікрозелені салату Ромен в NFT системах. *Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання с/г продукції* : мат. Всеукр. н.-пр. конф. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. С. 6–8.

137. Balwin D. Hydroponic Systems: Construction of the Hydroponic Systems. Independently Published, 2022.

138. Barbieri G., Quintero G., Otero J. et al. A mathematical model to enable the virtual commissioning simulation of wick soilless cultivations. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2021. Vol. 16. No 4. P. 3325–3342.

139. Aji G.K., Haton K., Morimoto T. Modeling the dynamic response of plant Growth to root zone temperature in hydroponic Chili pepper plant using neural networks. *Agriculture*. 2020. Vol. 10 (6). P. 234.

140. Калетнік Г.М., Соколенко О.М. Результати досліджень одноярусної гідропонної установки з пружними елементами, що несуть, на предмет динамічної стійкості в процесі розвантаження врожаю методом тензометрування.. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2010. Вип. 10. Т. 6. С. 173–182.

141. Калетнік Г.М. Соколенко О.М. До питання стійкості руху лотків механічних гідропонних установок без напрямних з пружно-жорсткими несучими елементами. *Техніка і технології АПК: науково-виробничий журнал*. 2010. № 9 (12). С. 31–39.

142. Калетнік Г.М. Соколенко О.М. Березовий М.Г. Теорія підйомних

установок для комплексів з вирощування гідропонного корму. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2010. Вип. 144. Ч. 4. 2010. С. 417.

143. Калетнік Г.М. Соколенко О.М. Інженерні проблеми виробництва гідропонного зеленого корму. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2010. Вип. 144. Ч. 3. С. 415.

144. Beverly R.B. A simple trar for a vegetable pfot seeder. *Hortscience*. 1987. Т. 22. No 5. P. 955.

145. Food security as long-term goals of strategic agricultural development / V. CHIRITESCU et al. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 2014. Vol. 71, no. 1. P. 26–31. URL: <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:9607> .

146. Doijode S. D. Seed Quality in Vegetable Crops. *Handbook of Seed Science and Technology*. Boca Raton, 2024. P. 677–701. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003578369-27> .

147. Kolipore A. Hydroponic Systems: The 15 Best Hydroponic Systems. Independently Published, 2021.

148. Барановський В.М., Борецька Т.Ю., Когут В.М. Інтерактивний вплив спектрального складу додаткового освітлення та температури кореневої зони на продуктивність гідропонного салату. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 24-30. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-4-3>

149. Солоня О.В., Мельник О.С. Пристрій для вирощування гідропонної продукції. Патент України на корисну модель № 153587, Україна. МПК (2023.01) A01G 31/02 (2006.01) A01G 31/06 (2006.01) A01G 29/00. Номер заявки: а 2021 01002 (22) Дата подання заявки: 01.03.2021. Вінницький національний аграрний університет. Опубл. 26.07.2023. Бюл. № 30.

150. Солоня О.В., Мельник О.С., Грищенко В.О. Моделювання системи мінерального живлення рослин в закритому ґрунті. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3(106). С. 72–77. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-10>.

151. Барановський В.М., Борецька Т.Ю. Автоматичне керування освітленням у гідропонних фермах. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. №1 (347). С. 25-28
URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-81>
152. Mottershead G., Bomben S., Kerszenbaum I., Klempner G. Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance. Wiley-IEEE Press, 2020. 672 p.
153. Abdel-Ghany A.M., Kozai T. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renew. Energy*. 2006. Vol. 31. P. 1521–1539.
154. Gulliver J. S., Roger E.A. A. Hydropower engineering handbook. McGraw-Hill, 1991. 752 p.
155. Olofsson T., Mahlia T. M. I. Modeling and simulation of the energy use in an occupied residential building in cold climate. *Applied Energy*. 2012. Vol. 91, no. 1. P. 432–438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.002> .
156. Bozchalui M. C., Canizares C. A., Bhattacharya K. Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6, no. 2. P. 827–835. URL: <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2372812> .
157. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application / E. Fitz-Rodríguez et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 70, no. 1. P. 105–116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.010> .
158. Зелінський А.М. Основи математичного моделювання. Київ : НМКВО, 1992. 243 с.
159. Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтяк В.В. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. Київ : НАУ, 2017. 392 с.
160. Смолінський С.В. Моделювання робочих процесів і машин. Київ : ЦП «КОМПРИНТ», 2020. 182 с.
161. Мельник О.С. Методологія проведення експериментальних досліджень гідропонної установки. *Актуальні задачі сучасних технологій* : тези

доп. XIII Міжн. нак.-техн. конф. молодих учених та студентів. (Тернопіль, ТНТУ ім. І Пулюя, 11-12 грудня 2024 р.) Тернопіль, 2014. С. 172–173.

162. Мельник О.С. Моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослин в гідропонній установці : *Сучасні вектори розвитку аграрної науки* тези доп. Міжн. наук.-практ. конф. (м. Кропивницький, 17-18 вересня 2024 р.). Кропивницький, 2024. С. 53–55.

163. Kuznietsova I., Bandura V., Paziuk V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 173–180.

164. Frey S., Dadalau A., Verl A. Expedient modeling of ball screw feed drives. *Production Engineering*. 2012. Vol. 6(2). P. 205 – 211.

165. Самойчук К.О., Верхованцева В.О. Методи теоретичних і експериментальних досліджень : електронний посібник. ТДАТУ, 2021. URL: elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_12/page9.html.

166. Бабицкий Л.Ф., Булгаков В.М., Войтюк Д.Г., Рябец В.И. Основы научных исследований. Київ : НАУ, 1999. 228 с.

167. Вологоміри Чижової | Лабімпекс ЛТД. *Лабораторні прилади та меблі лабораторні в Києві та Україні | Лабімпекс ЛТД*. URL: <https://labimpex.com.ua/ua/g95782631-vlagomery-chizhovoj?srsId=AfmBOoqr9bzimMJDR6Sf0CnK6F-LxtJSqc8vDU6LSOudr9PufUc6DT4P> (дата звернення: 10.11.2024).

168. Теорія планування експериментів: [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.

169. Черняк О.І., Ставицький А.В. Динамічна економетрика. Київ : КВІЦ, 2000. 120 с.

170. Box, G.E.P, Behnken D.W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*. 1960. Vol. 2. №4. P. 455–475.

171. Карташов М.В. Імовірність, процеси, статистика. Київ : ВПЦ

Київський університет, 2007. 504 с.

172. Білецький В.С. Методологія наукових досліджень технічних об'єктів та їх оптимізація. навч. посіб. Київ : ФОП Халіков Руслан Халікович, 2023. 118 с.

173. Пилипчук М.І., Григор'єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень. Київ : Знання, 2007. 270 с.

174. Borysiuk D., Spirin A., Kupchuk I., Tverdokhlib I., Zelinskyi V., Smyrnov Ye., Ognevyy V. The methodology of determining the place of installation of accelerometers during vibrodiagnostic of controlled axes of wheeled tractors. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021.Vol. 97, No 10. P. 44–48. URL:<http://dx.doi.org/10.15199/48.2021.10.09>

175. Gunko I., Hraniak V., Yaropud V., Kupchuk I., Rutkevych V. 2021. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol. 97. No 7. P. 76–79. <https://doi.org/10.15199/48.2021.07.15>

176. Honcharuk I., Kupchuk I., Solona O., Tokarchuk O., Telekalo N. Experimental research of oscillation parameters of vibrating-rotor crusher. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97. No 3. P. 97–100. URL:<https://doi.org/10.15199/48.2021.03.19>

177. Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Poberezhets J., Tokarchuk O., Hontar V., Didyk A. Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 1, no. 11. P. 181–185. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2021.11.33>

178. Navulur S., S. C. S. Sastry A., N. Giri Prasad M. Agricultural Management through Wireless Sensors and Internet of Things. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2017. Vol. 7, no. 6. P. 3492-3499. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499>.

179. Paulus D. et al. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. *Revista Ceres*. 2012. Vol. 59. P. 110–117.

180. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions / E. Sisinni et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14, no. 11.

P. 4724–4734. URL: <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2852491> .

181. Васильковська К.В., Ковальов М.М., Андрієнко О.О. Технічне забезпечення ін'єкційного зрошення овочевих культур. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2021. Вип. 51. С. 14-20. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.14-20>

182. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218. URL: <https://doi.org/10.15159/jas.20.22>

183. Гончарук І. В., Купчук І. М., Солон О. В., Мельник О. С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

184. Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г. Метод та засіб прямого автоматизованого вимірювального контролю ізоляції обмоток електричних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109). С. 129-137. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-14>

185. Купчук І. М., Зубар І. В., Онищук Ю. В., Дідик А. М., Замрій М. А. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.2» («Harvesting cereals v. 1.2») : Свідоцтво № 103729 від 05.04.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

186. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

187. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на

твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro- transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.

188. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Телекало Н. В., Токарчук О. А. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v.1.0» («Harvesting cereals v.1.0») : Свідоцтво № 100674 від 17.11.2020. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 62, 2021.

189. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.

190. Гончарук І.В., Купчук І.М., Солоня О.В., Мельник О.С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюл. № 64. 2021.

191. Севостьянов І.В., Мельник О.С., Підлипна М.П. Дослідження параметрів ефективності процесів класифікації сухої зернової сировини при використанні різних схем її навантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3(102). С. 109–116. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-3-12>

192. Севостьянов І.В., Мельник О.С., Краєвський С.О., Горбаченко А.А. Дослідження відцентрового подрібнювача зернової сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 2(101). С. 13–26. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-2-2>

193. Мельник О.С. Дослідження розробленого апарату управління гідропонними установками. *Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України* : тези доп. VI наук.-практ. конф. (м.

Київ, 25-26 вересня 2024 р.). Київ, 2024. С. 15–17.

194. Техніко-економічне обґрунтування застосування машин, обладнання і технологій : навч. посіб / Р.Б. Гевко та ін. Тернопіль. 2002. 164 с.

195. Васильковська К.В, Ковальов М.М., Андрієнко О.О., Корнічева Г.І. Технічне забезпечення гідропоніки, як прогресивного виду вирощування овочевих культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 52. 2022. С. 81-86. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.81-86>)

196. 7eminar. Погодинна оплата праці: що враховувати в 2025 році. 7eminar. URL: <https://7eminar.ua/news/3029-pogodinna-oplata-praci-shho-vraховувати-v-2025-roci> (дата звернення: 17.12.2024).

197. Методики економічного оцінювання техніки на етапі випробування: ДСТУ 4397:2005. [Чинний від 2006-01-01]. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 16 с. (Міждержавний стандарт).

198. Тарифи на передачу електроенергії для підприємств у 2025 році. Ставки, індекси, тарифи. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/trans/> (дата звернення: 18.04.2024).

199. AUTO.RIA – Ціни на бензин, дизель (дп), газ на АЗС сьогодні 08.04.25. AUTO.RIA. URL: <https://auto.ria.com/uk/toplivo/> (дата звернення: 05.12.2024).

200. Тарифи на водопостачання та водовідведення (Вінниця). *Ставки, індекси, тарифи*. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/water/vinnica/> (дата звернення: 18.04.2024).

ДОДАТКИ

Додаток А

Патент України на корисну модель



Додаток Б

Таблиця Б1 – План-матриця планованого факторного експерименту типу
ПФЕ 3^2

№ досл.	Рівні факторів			Взаємодія факторів	Параметр оптимізації, У			Середні значення У _{іс}
					Повторюваність			
	х ₀	х ₁	х ₂		х ₁ х ₂	1	2	
1	+1	-1	-1	+1	У ₁₁	У ₁₂	У ₁₃	У _{1с}
2	+1	+1	-1	-1	У ₂₁	У ₂₂	У ₂₃	У _{2с}
3	+1	0	-1	0	У ₃₁	У ₃₂	У ₃₃	У _{3с}
4	+1	-1	+1	-1	У ₄₁	У ₄₂	У ₄₃	У _{4с}
5	+1	+1	+1	+1	У ₅₁	У ₅₂	У ₅₃	У _{5с}
6	+1	0	+1	0	У ₆₁	У ₆₂	У ₆₃	У _{6с}
7	+1	-1	0	0	У ₇₁	У ₇₂	У ₇₃	У _{7с}
8	+1	+1	0	0	У ₈₁	У ₈₂	У ₈₃	У _{8с}
9	+1	0	0	0	У ₉₁	У ₉₂	У ₉₃	У _{9с}

Додаток В

Методика планування експериментів і статистичної обробки експериментального масиву даних

Оскільки при проведенні експериментів змінні незалежні фактори неоднорідні і мають різні одиниці вимірювання, а числа, що виражають значення цих факторів – різні порядки, то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від натуральних величин до кодованих.

Зв'язок між кодованими x_i та натуральними X_i змінними факторами встановлювали за залежністю:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (\text{B.1})$$

де X_{i0} – натуральне значення i -го фактору на нульовому рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактору.

Нульовий рівень, або середнє значення кожного вхідного фактора, визначали за формулою:

$$X_0 = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}, \quad (\text{B.2})$$

де X_0 , $X_{\max}$, $X_{\min}$ – відповідно, числове значення нульового, верхнього та нижнього рівня вхідного фактора.

Визначали інтервали варіювання факторами:

$$\Delta X_i = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}. \quad (\text{B.3})$$

Коефіцієнти апроксимуючого полінома, представленого у вигляді повного квадратичного рівняння, при умові ортогональності і симетрії план-матриці проведення експериментальних досліджень з визначення максимальної робочої висоти h_{pe} утвореної суміші, коефіцієнта однорідності k_{oe} приготовленої рідкої опари та висоти h_{oe} бродіння опари визначали за загальними формулами:

- вільний член b_0 рівняння регресії та коефіцієнти b_i кожного i -го фактора

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{N}; \quad (\text{B.4})$$

- коефіцієнти взаємодії вхідних факторів b_{ij}

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}, \quad (\text{B.5})$$

де x_{iu} – значення кодованої змінної у відповідному стовпці симетричної план-матриці; $\bar{y}_u$ – середній результат u -го дослідів; u – порядковий номер дослідів; $i; j, k$ – відповідно, номер фактора та номер фактора, відмінного від i -го; N – кількість проведених експериментів.

Статистичну значимість коефіцієнтів b_i кожного окремого фактора та коефіцієнтів взаємодії b_{ij} рівняння регресії проводили за t -критерієм Ст'юдента та визначали у такій послідовності:

- визначали дисперсію похибок дослідів у рядках плану

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{uj} - \bar{y}_u)^2, \quad (\text{B.6})$$

де n – кількість паралельних дослідів (повторності одного експерименту);

$j = 1, 2, \dots, n$;

- визначали дисперсію відтворення дослідів

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2, \quad (\text{B.7})$$

- визначали похибку відтворення

$$S_y = \sqrt{S_y^2}, \quad (\text{B.8})$$

- визначали умову значимості коефіцієнтів b_i рівняння регресії

$$b_{i(jk)} > t_T S_y / \sqrt{Nn}, \quad (\text{B.9})$$

де t_T – табличне значення коефіцієнта Ст'юдента, яке вибирається з таблиці залежно від ступеня відповідності f та рівня значимості α .

Ступень відповідності визначається:

$$f = (n-1)N, \quad (\text{B.10})$$

де n – число повторності експерименту (паралельні дослідів за одних і тих рівнів варіювання факторів).

Якщо умова значимості (10) не виконується, то такий коефіцієнт b_i рівняння регресії приймали рівним нулю, а відповідний член x_i рівняння регресії виключали.

Перевірку адекватності вибраної математичної моделі експериментальним даним, тобто відповідність математичної моделі реальному процесу, або отриманому експериментальному масиву даних здійснювали за F -критерієм Фішера наступним чином:

- визначали дисперсію адекватності:

$$S_{ag}^2 = \frac{n}{N - g'} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (\text{B.11})$$

де $N - g'$ – число степенів вільності дисперсії адекватності; g' – число значимих коефіцієнтів в рівнянні регресії; $\bar{y}_u$ – середнє значення відгуку в u -му досліді; $\tilde{y}_u$ – значення відгуку в u -й точці плану, обчислене за рівнянням регресії; визначали розрахунковий критерій адекватності емпіричної моделі, або критерій Фішера F_p

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2}, \quad (\text{B.12})$$

де S_y^2 – дисперсія відтворення дослідів;

- визначали табличне значення критерію Фішера F_T за заданим рівнем значимості α і двома степенями відповідності $f_{ag} = N - g$ та $f_y = N(n - 1)$.

Умову адекватності математичної моделі перевіряли згідно нерівності

$$F_p < F_T. \quad (\text{B.13})$$

Отримане значення F_p порівнювали з табличним F_T . Якщо умова $F_p < F_T(0,05, f_{ag}, f_y)$ виконувалась, тобто розрахункове значення F_p -критерію Фішера було менше табличного F_T при 5 %-му рівні значущості, числі степені вільності дисперсії адекватності $f_{ag} = N - g$ та числа степені вільності дисперсії відтворюваності $f_y = N(n - 1)$, тоді рівняння регресії є адекватним експериментальним даним.

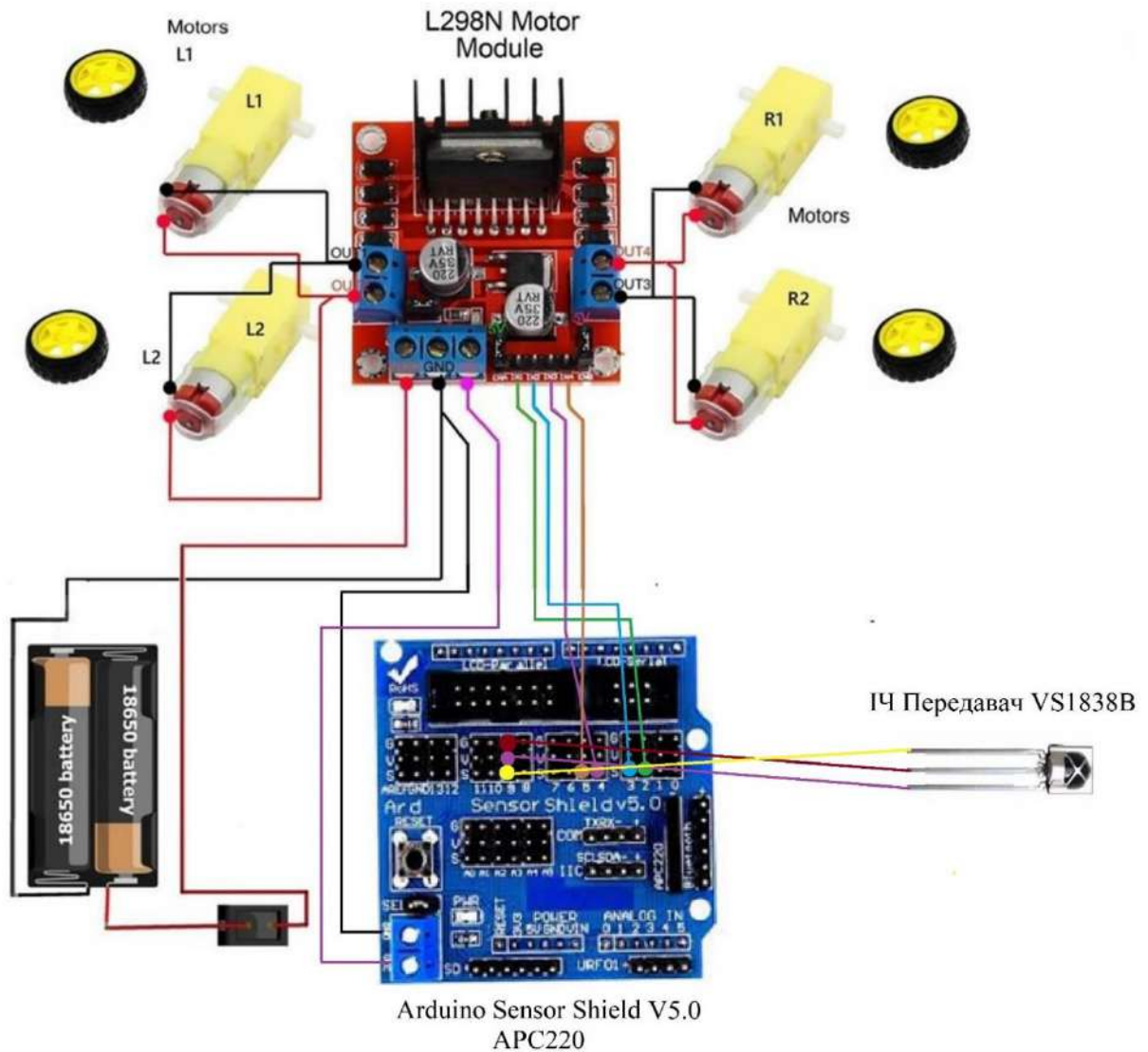
Додаток Г

Таблиця Г1 – Рандомізована несиметрична план-матриця Бокса-Бенкіна
планованого факторного експерименту типу ПФЕ 3^3

№ екс.	Вхідні фактори та їх взаємодія									Параметр оптимізації	
	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{11}	x_{22}	x_{33}	k_3	k_c
1	+	+	0	+	0	0	+	+	0	k_{13}	k_{1c}
2	-	+	0	-	0	0	+	+	0	k_{23}	k_{2c}
3	+	-	0	-	0	0	+	+	0	k_{33}	k_{3c}
4	-	-	0	+	0	0	+	+	0	k_{43}	k_{4c}
5	+	0	+	0	+	0	+	0	+	k_{53}	k_{5c}
6	-	0	+	0	-	0	+	0	+	k_{63}	k_{6c}
7	+	0	-	0	-	0	+	0	+	k_{73}	k_{7c}
8	-	0	-	0	0	0	+	0	+	k_{83}	k_{8c}
9	0	+	+	0	0	+	0	+	+	k_{93}	k_{9c}
10	0	-	+	0	0	-	0	+	+	k_{103}	k_{10c}
11	0	+	-	0	0	-	0	+	+	k_{113}	k_{11c}
12	0	-	-	0	0	+	0	+	+	k_{123}	k_{12c}
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k_{133}	k_{13c}
14	0	+	0	0	0	0	0	+	0	k_{143}	k_{14c}
15	-	0	-	0	+	0	+	0	+	k_{153}	k_{15c}

Додаток Д.1

Підключення елементів апаратного забезпечення
до Arduino Sensor Shield V5.0 APC220



Додаток Д.2

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 103284

Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0»)

(випл. назва твору)

Автор(и) Гончарук Інна Вікторівна, Купчук Ігор Миколайович, Солона Олена Василівна, Мельник Олександр Сергійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 18 березня 2021 р.

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

 Андрій КУДІН

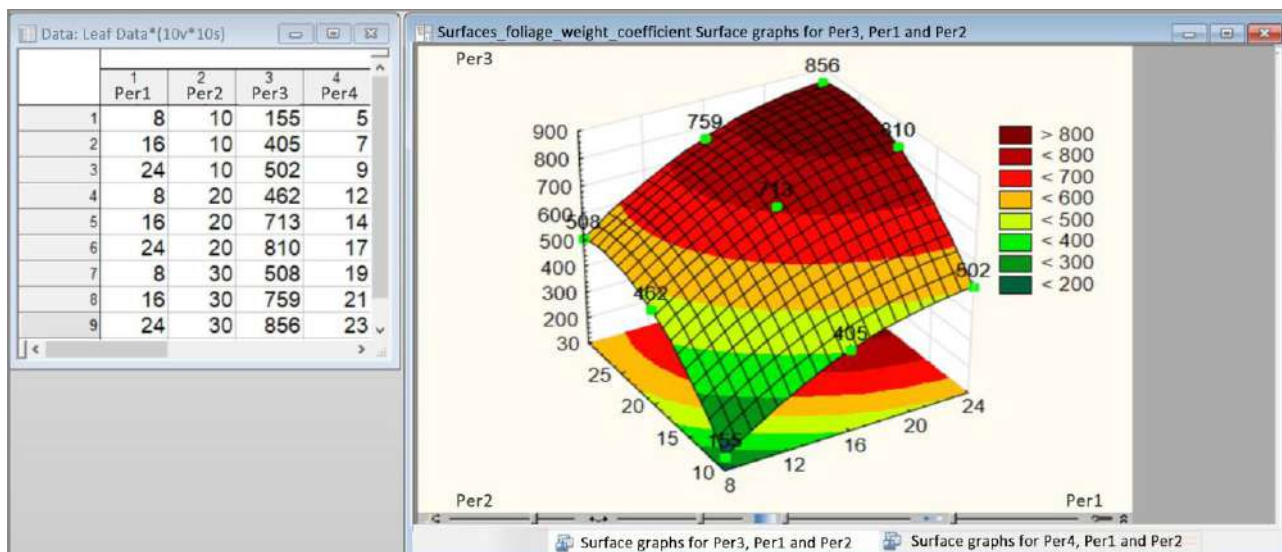


ПК - Україна». Зам. 20-2002. 2020 р. II кв.

Додаток Е.1

Експериментальний масив даних площі листової поверхні $S_{лс}$

та маси листя $M_{лс}$ рослин салату



Пер1 – Час опромінення T_o , год.;

Пер2 – інтенсивність опромінення E_o , Вт/м²;

Пер3 – площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату, см²;

Пер4 – маса листя $M_{лс}$ рослин салату, г.

Додаток Е.2

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату

Data: Leaf Data*(10v*10s)

	1 Per1	2 Per2	3 Per3	4 Per4
1	8	10	155	5
2	16	10	405	7
3	24	10	502	9
4	8	20	462	12
5	16	20	713	14
6	24	20	810	17
7	8	30	508	19
8	16	30	759	21
9	24	30	856	23

Leaf_area_coefficients* - T-test for dependent samples (Leaf data)

T-test for oversamples (Data-leaves)
Differences significant at the level of $p < .05000$

Variable	Average	Std. deviation	N different	Std. devi diff.	t	cc	p	Trust. -95,000%	Trust. +95,000%
Per1	16.0000	6.9282							
Per1	16.0000	6.9282	9	0.000	0.0000	8	1.000000	0.0000	0.0000
Per1	16.0000	6.9282							
Per2	20.0000	8.6603	9	-4.000	11.0905	-1.08200	8	0.310784	-4.5249 12.5249
Per1	16.0000	6.9282							
Per3	574.4444	227.7527	9	-558.444	223.2337	-7.50484	8	0.000069	386.8518 730.0370
Per2	20.0000	8.6603							
Per1	16.0000	6.9282	9	4.000	11.0905	1.08200	8	0.310784	-4.5249 12.5249
Per2	20.0000	8.6603							
Per2	20.0000	8.6603	9	0.000	0.0000	0.00000	8	1.000000	0.0000 0.0000
Per2	20.0000	8.6603							
Per2	574.4444	227.7527	9	-554.444	222.0220	-7.49175	8	0.000070	383.7832 725.1057
Per3	574.4444	227.7527							
Per1	16.0000	6.9282	9	558.444	223.2337	7.50484	8	0.000069	386.8518 730.0370
Per3	574.4444	227.7527							
Per2	20.0000	8.6603	9	554.444	222.0220	7.49175	8	0.000070	383.7832 725.1057
Per3	574.4444	227.7527							
Per3	574.4444	227.7527	9	0.000	0.0000	0.00000	8	1.000000	0.0000 0.0000

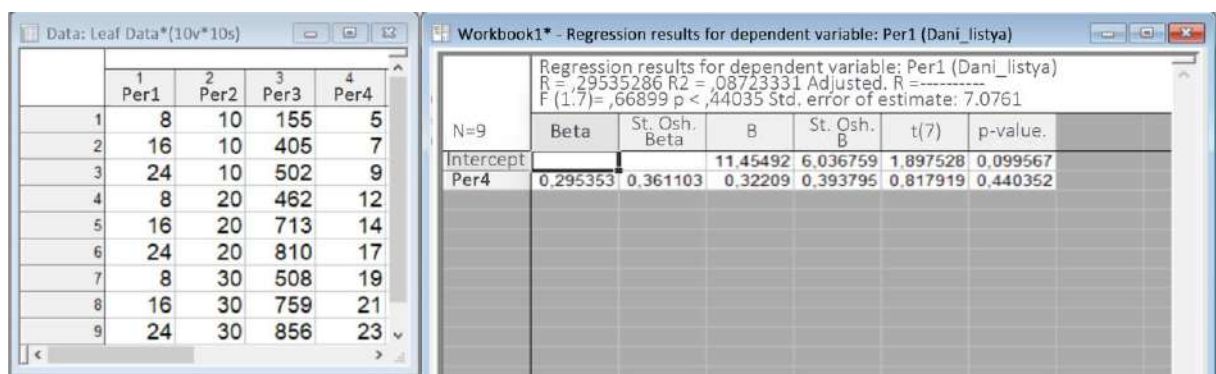
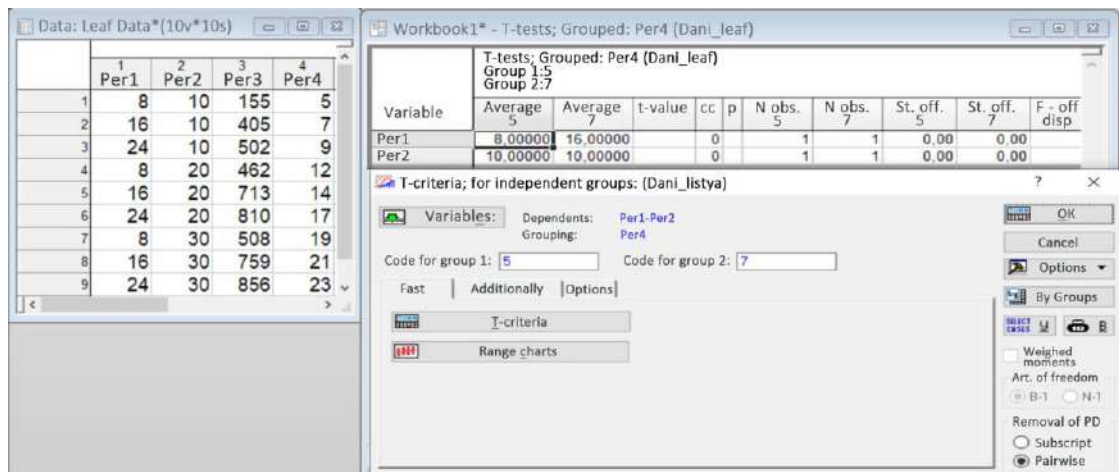
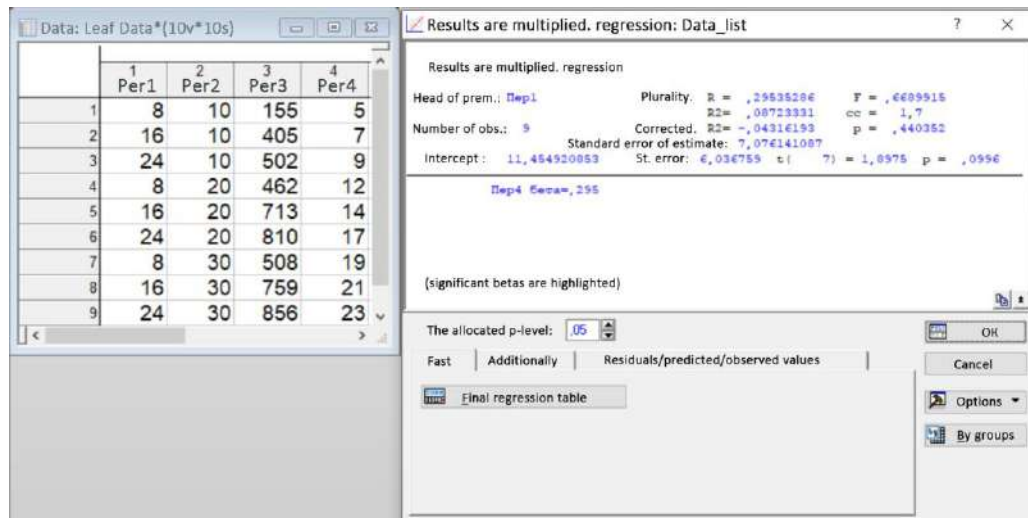
T-test for dependent samples (Leaf data)

Data: Leaf Data*(10v*10s)					Surface_coefficient_leaf* - Final statistics; Salary: Per3	
	1 Per1	2 Per2	3 Per3	4 Per4	Statistics	Final statistics; Salary: Per3
1	8	10	155	5	Plurality. R	0.942893275
2	16	10	405	7	Plurality. R2	0.889047728
3	24	10	502	9	Corrected. R2	0.852063638
4	8	20	462	12	F(2.6)	24.0386532
5	16	20	713	14	p	0.00136586768
6	24	20	810	17	St. Osh. Ratings	87.5993616
7	8	30	508	19		
8	16	30	759	21		
9	24	30	856	23		

Data: Leaf Data*(10v*10s)					Leaf_area_coefficients* - Regression result for dependent variable: Pur3						
	1 Per1	2 Per2	3 Per3	4 Per4	Regression results for dependent variable: Pur3 (Dani Listya) R=0.94289328, R2=0.88904773, Corrected R=0.85206364 F=(2,6)=24.039 p<0.00137, Standard error of estimate: 87,599						
1	8	10	155	5	N=9	BETA	St. Osh. BETA	B	St. Osh. B	t(6)	p-value
2	16	10	405	7	Intercept			-126.889	105.2813	-1.20524	0.273485
3	24	10	502	9	Per1	0.660998	0.135985	21.729	4.4703	4.86080	0.002821
4	8	20	462	12	Per2	0.672406	0.135985	17.683	3.5762	4.94469	0.002592
5	16	20	713	14							
6	24	20	810	17							
7	8	30	508	19							
8	16	30	759	21							
9	24	30	856	23							

Додаток Е.3

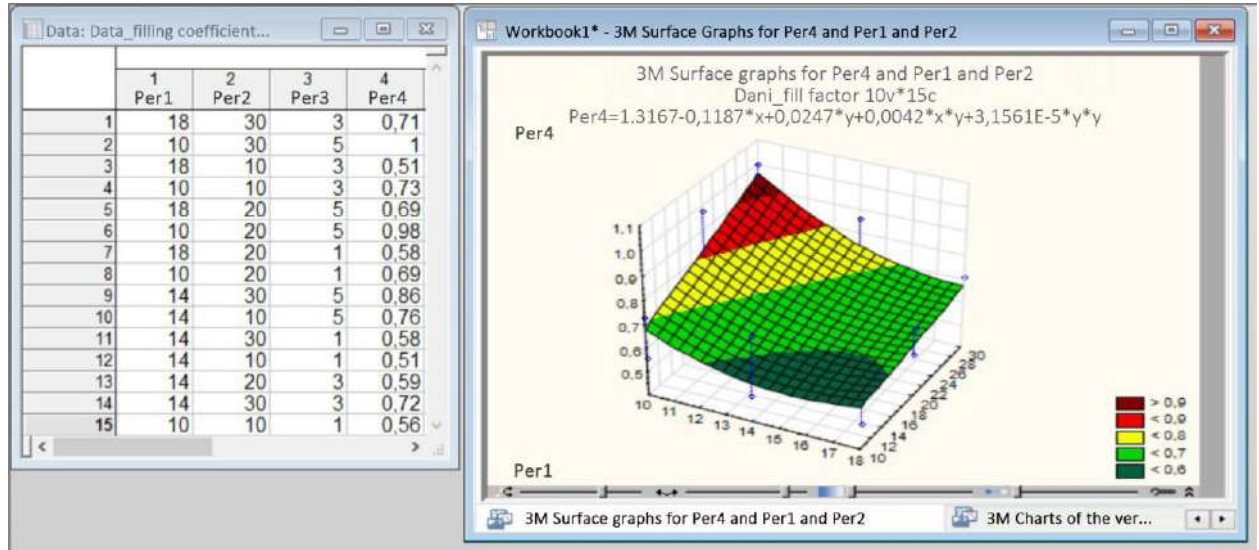
Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних маси
листя $M_{лс}$ рослин салату



Додаток Ж.1

Результати пророщування мікрозелені сочевиці

Експериментальний масив даних коефіцієнта заповнення k_z насінням сочевиці
площі поверхні лотка



Пер1 – вологість зерна w_z , %;

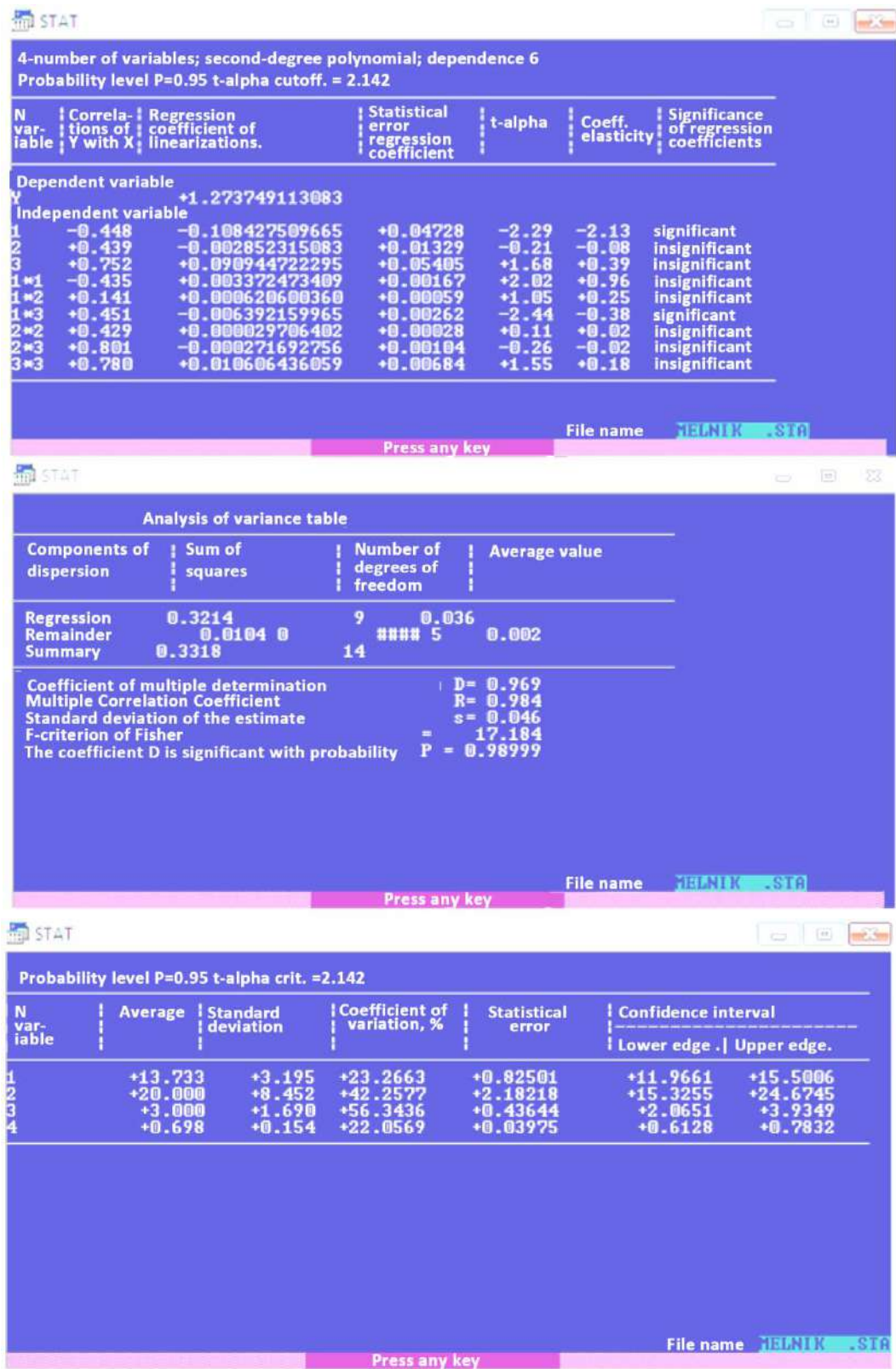
Пер2 – кут нахилу лотка α_l , град.;

Пер3 – кількість коливань лотка n_l , раз;

Пер4 – коефіцієнт заповнення зерном площі поверхні лотка k_z .

Додаток Ж.2

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних
коефіцієнта заповнення k , насінням сочевиці площі поверхні лотка



Додаток И



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

22 травня 2023 р. № Д1.1-60-541
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про провадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи Мельника Олександра Сергійовича
на тему: «Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів та
режимів роботи гідропонної установки»

Повідомляємо, що наукові розробки Мельника Олександра Сергійовича за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовило їх впровадження у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці інженерно-технологічного факультету.

Положення дисертаційної роботи використовуються при викладанні навчальних дисциплін «Мехатроніка і мобільна робототехніка» та «Система точного землеробства».

Довідка видана Мельнику О.С. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 12 травня 2023 р., протокол №7.

Ректор



Віктор МАЗУР

Вик.: Ірина РОМИГАЙЛО
№ 01447

Додаток К

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університету

Доктор МАЗУР

2024р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПСП "Агрофірма
Нападівська"

Сергій ПЕТРЕНКО

«16» грудня 2024р.

АКТ

про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Мельник Олександр Сергійович під керівництвом к.т.н., доцента кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ Купчука Ігора Миколайовича, з однієї сторони, і представник ПСП "Агрофірма Нападівська" (ЄДРПОУ 32292489, Вінницька обл., Вінницький р-н., с. Нападівка, вул. Центральна, буд. 7) директор Петренко Сергій Миколайович, з другої сторони, склали цей акт про те, що удосконалена Мельником О.С. багатоярусна гідропонна установка проходила виробничу перевірку на базі ПСП "Агрофірма Нападівська". Дослідження проводили на гідропонних модулях, які розділені світлонепроникними екранами, які не дозволяють проникати світлу в сусідні секції, але забезпечують циркуляцію повітряних потоків, в лабораторному приміщенні без природного освітлення. У секціях підтримувались температура повітря 18-20°, відносна вологість повітря 60-70%, вміст CO₂ не менше 0,03%, швидкість повітря 0,3-0,5 м/с. Мінеральне споживання рослин здійснювали живильними розчинами, їх склад на протязі досліду залишався постійним. Мінеральне споживання рослин здійснювали живильними розчинами загального використання. Вимір складу елементів живлення та їх коригування здійснювали вручну для кожного досліду. В якості екстракту застосовувався розчин агроперліту.

В якості вхідних факторів було використано τ час опромінення (фотоперіод) на трьох рівнях: $T_o = 8; 16; 24$ години на добу, а також величина опромінення $E_o = 10; 20; 30$ Вт/м², тобто реалізовано двофакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами ПФЕ 3².

В якості джерел опромінення були використані експериментальні світлодіодні випромінювачі. Потрібний спектри випромінювання задавався пропорцією між синім, зеленим та червоним світлодіодами, а також величиною струму через світлодіоди.

Спектральний склад всіх випромінювачів був однаковий, а співвідношення енергії в окремих спектральних діапазонах $k_{син} = 30\%$, $k_{зел} = 20\%$, $k_{чер} = 50\%$. Середнє квадратичне відхилення частки енергії в окремих спектральних діапазонах від середнього складало не більше 2,5%.

Величину випромінювання рослин на протязі всього вегетаційного періоду підтримували на одному рівні шляхом зміни висоти підвіски засобів опромінення.

Окрім проведення основних експериментів типу ПФЕ 3² згідно з

розробленою план-матрицею додатково провели проміжні експерименти, які включали в собі проведення двох додаткових серій дослідів в проміжних точках різних комбінацій вхідних факторів за таких значень: час опромінення $T_o = 12$ год., $T_o = 22$ год.; інтенсивність опромінення $E_o = 15$ Вт/м², $E_o = 25$ Вт/м².

Основним завданням таких досліджень було встановлення функціонального характеру розвитку рослин салату від зміни дози опромінення, яку позначили індексом H_o , при цьому $H_o = T_o E_o$, Вт год./м².

Розраховані параметри дози опромінення рослин при проведенні експериментів типу ПФЕ 3² та додаткових експериментів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Розраховані дози опромінення H_o , Вт год./м²

Параметри		Інтенсивність опромінення E_o , Вт/м ²				
		10	15	20	25	30
Час опромінення T_o , год.	8	80	120	160	200	240
	12	120	180	240	300	360
	16	160	240	320	400	480
	20	200	300	400	500	600
	24	240	360	480	600	720

Для об'єктивної оцінки впливу опромінення на розвиток рослин використовували модель яка враховує динаміку зміни площі кожного листа рослини та його маси. Листки з рослин одного віку розділяли на групи, у відповідності з їх номером N , у порядку появи на стеблі. Фіксувались кількість листя на рослині $z_{лс}$, їх геометричні розміри (довжину вздовж черешка A_n і найбільшу ширину B_n), сиру масу $M_{лс}$. Параметри розвитку рослини салату зручно визначати за площею його листка.

Згідно результатів проведених розрахунків з застосуванням пакетів прикладної програми статистичного оброблення для персонального комп'ютера та аналізу отриманих статистичних результатів, будували поверхні відгуку та їх двомірні перерізи для графічного зображення результатів функціональної зміни площі листової поверхні рослини $S_{лс}$ та маси листя $M_{лс}$ залежно від вхідних факторів.

Результати проведених додаткових експериментів з визначення площі листової поверхні $S_{лс}$, маси листя $M_{лс}$ та кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату залежно від дози опромінення H_o (Вт год./м²) наведено в табл.2.

Встановлено, що за зміни часу опромінення T_o та інтенсивності опромінення E_o рослин відповідно, в діапазоні від 8 до 24 год. та від 10 до 30 Вт/м² площа листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату збільшується в середньому в 1,7...3,2 рази.

Домінантним фактором, які суттєво впливає на зміну маси листя $M_{лс}$ рослин салату є інтенсивність опромінення E_o рослин салату – за зміни інтенсивності опромінення E_o рослин в діапазоні від 10 до 30 Вт/м² маса листя $M_{лс}$ рослин салату збільшується приблизно в 3,6...3,9 рази.

Таблиця 2 – Експериментальні значення площі листової поверхні $S_{лс}$, маси листя $M_{лс}$ рослин салату та кількості листків $z_{лс}$ на рослинах салату під час проведення додаткових досліджень

Параметр			Інтенсивність опромінення H_o , Вт год./м ²				
			10	15	20	25	30
			Доза опромінення $H_o = T_o E_o$, Вт год./м ²				
			80, 120, 160, 200, 240	120, 180, 240, 300, 360	160, 240, 320, 400, 480	200, 300, 400, 500, 600	240, 360, 480, 600, 720
Час опромінення T_o , год.	8	$S_{лс}$, см ² ;	155; 5; 8	223; 5; 8	462; 7; 8	483; 15; 9	508; 18; 9
	12		223; 5; 8	348; 9; 8	502; 9; 9	524; 16; 10	548; 19; 10
	16	$M_{лс}$, г;	405; 7; 8	432; 9; 9	716; 14; 10	742; 17; 10	759; 20; 11
	20		461; 8; 8	491; 11; 9	753; 15; 10	771; 19; 11	816; 21; 12
	24	$z_{лс}$, шт.	502; 9; 9	583; 13; 9	810; 17; 11	830; 21; 12	856; 23; 13

Значне збільшення площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату (майже в 1,6 рази – від 500 до 850 см²) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст площі листової поверхні $S_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 40...50 см².

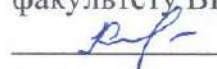
Значне збільшення маси листя $M_{лс}$ рослин салату (майже в 3 рази – від 5 до 15 г) спостерігається за дози опромінення H_o , яка більша за значення 350 Вт год./м², при цьому в межах зміни дози опромінення $480 \leq H_o \leq 720$ Вт год./м² приріст маси листя $M_{лс}$ рослин салату незначний – в середньому на 1,5...2,0 г.

Кількість листків $z_{лс}$ на рослинах салату в межах зміни дози опромінення $80 \leq H_o \leq 200$ Вт год./м² майже не змінюється та становить в середньому 8 шт., а інтенсивність приросту за дози опромінення до 300 Вт год./м є постійною та дорівнює 1 шт.

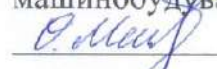
Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалена гідропонна установка є більш ефективною, ніж базова.

Від ВНАУ

к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ

 Ігор КУПЧУК

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

 Олександр МЕЛЬНИК

« 16 » грудня 2024р.

Від ПСП «Агрофірма Нападівська»
директор



Сергій ПЕТРЕНКО

« 16 » грудня 2024р.

Додаток Л

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Ректор Вінницького національного
 аграрного університету

 Віктор МАЗУР
 «12» листопада 2024р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «Агромаш-Калина»

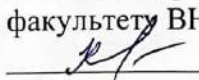
 Юрій БЕЗУГЛИЙ
 «12» листопада 2024р.

А К Т
про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи

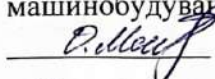
Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Мельником Олександром Сергійовичем під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, заступника декана з наукової роботи інженерно-технологічного факультету, провідного наукового співробітника Вінницького національного аграрного університету, Купчука Ігоря Миколайовича впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Вінницька область, Хмільницький район, місто Калинівка, вул. Незалежності, 46). ТОВ «Агромаш-Калина» в особі директора Безуглого Юрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію гідропонної установки, яка розроблена в межах виконання дисертаційної роботи «Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів та режимів роботи гідропонної установки» Мельником О.С. і Купчуком І.М.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» зацікавлене у виготовленні дослідних зразків гідропонних установок у кількості 5 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва.

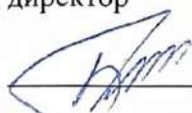
Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ
 к.т.н., доцент кафедри інженерної
 механіки та технологічних процесів в
 АПК інженерно-технологічного
 факультету ВНАУ

 Ігор КУПЧУК

Здобувач третього освітньо-наукового
 рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
 машинобудування»


 Олександр МЕЛЬНИК
 «12» листопада 2024р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»
 директор


 Юрій БЕЗУГЛИЙ



«12» листопада 2024р.