

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНО ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Синицина Єлизавета Юріївна

УДК 621.9.62-92

**ДИСЕРТАЦІЯ
ГІДРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА ОБ'ЄКТУ ТЕПЛИЧНОГО
ГОСПОДАРСТВА СЕРЕДНЬОГО ОБ'ЄМУ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
Синицина Єлизавета Юріївна

Науковий керівник : Губарев Олександр Павлович

Доктор технічних наук, професор

Київ - 2025

АНОТАЦІЯ

Синицина Єлизавета. Гідропневматична система об'єкту тепличного господарства середнього об'єму. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Наша країна вже досить довгий час славиться якісною сільськогосподарською продукцією по всьому світу. Причина такої слави є родючі ґрунти та працьовитий народ. Вирощена продукція покриває не тільки потреби країни, а й експортується за її межі. На жаль, сьогодні не кожна країна може похизуватися такими можливостями. Оскільки кліматичні умови різні і не вся продукція може там рости. У теплицях використовують механічне керування мікрокліматом, що займає досить багато часу на обслуговування та є економічно невигідно в оплаті обслуговуючого персоналу. Для великих площ застосовують автоматичні системи, які, у свою чергу, не завжди охоплюють увесь об'єм інформації (кліматичних умов). Такі системи, зазвичай, працюють не ефективно і не можуть прогнозувати роботу системи при зміні різних зовнішніх та внутрішніх параметрів.

Різкі зміни температури та вологості повітря негативно впливають на вирощування сільськогосподарських культур. Сучасні методи регулювання мікроклімату тепличних об'єктів зводяться до найпростішого – регулювання швидкості потоку, вологості та температури повітряних мас. Тому виникає питання у створенні універсальної системи для вирощення сільськогосподарських продуктів, а саме ефективної автоматизації інженерних систем.

У дисертації розроблено автоматизовану мехатронну систему мікроклімату теплиці. Дисертація складається з п'яти розділів, основний зміст та результати кожного з яких наведено нижче.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і задачі дослідження, наведено методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також представлено дані про апробацію роботи.

У першому розділі виконано огляд інженерних систем тепличного об'єкту та їх конструктивні особливості. Проведено порівняльний аналіз теплиць по їх габаритним розмірам, складності монтажу, наявності інженерних систем та систем управління. Визначено напрямок дослідження, основні функції та особливості систем управління мікрокліматом теплиці. З'ясовано їх переваги та недоліки; на основі вказаного аналізу було сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі сформовано підґрунтя для розроблення структури мехатронної системи тепличного об'єкта середнього об'єму. Розглянуто загальні функції системи мікроклімату та визначено вимоги до системи керування. Встановлено: температура повітря в середині теплиці має бути в діапазоні 20-30 °С, вологість повітря в межах 60-90%, CO₂ слід утримувати щонайменше до зовнішнього рівня, від швидкості та напрямку вітру залежить яке вікно провітрювання і на скільки відкривати в теплиці. За рахунок перехідні процеси зміни швидкості, тиску, вологості та температури; змін та втрати теплової потужності теплиці; змін та втрати вологості повітря в теплиці було запропоновано структура мехатронної системи з моделлю теплиці. Запропоновано розділити структуру мехатронної системи на підсистеми. Розроблено принципову схему системи вентиляції та рециркуляції, також розроблено та розраховано систему повітропроводів довжиною 10 метрів та перерізом 360x360мм. Підібрано вентилятор з максимальною продуктивністю 1400 м3/год. Розраховано крутний момент та визначено зусилля, яке має забезпечити пневматичний привід 2360 Н при 0,6 МПа при закритті заслінки та 2770 при відкритті. Розраховано систему обігріву теплиці та підібрано нагрівач на 5,0 кВт. Розроблено загальну схему виконавчих пристроїв для системи вентиляції, зашторювання, опалення та вікон провітрювання. Розраховано

систему поливу та зволоження теплиці, встановлено, що діаметр розпилення форсунки складає 2,5 метри, тому для підтримання сталого режиму в теплиці достатньо використовувати 3 форсунки під час рециркуляції повітря. Запропоновано загальну структуру та комп'ютерну модель тепличного об'єкта.

У третьому розділі виконано дослідження фізики тепло-масообмінних процесів в середині теплиці, з метою визначення вимог до моделі об'єкту керування. Теоретично обґрунтовано тепло-масообмінні процеси в теплиці, які базуються на балансі теплових потоків повітря. Теоретично обґрунтовано теплові втрати через огорожувальну конструкцію теплиці з полікарбонату з врахуванням її розмірів та визначено загальний коефіцієнт теплопередачі. Теоретично визначено рівняння теплового балансу та аеродинамічних процесів через рівняння Нав'є-Стокса. Для чисельного розрахунку руху повітря за рівнянням Нав'є-Стокса було додано рівняння нерозривності для стисливого середовища. Теоретично розглянуто узагальнений процес переносу водяної пари повітрям в середині теплиці. Визначено задачі для комп'ютерної моделі, а саме: тестування моделі і визначення змін параметрів мікроклімату; визначення полів розподілення тиску, швидкості, температури, вологості по об'єму теплиці; отриманні прогнозованих змін параметрів впродовж певного терміну.

У четвертому розділі представлено етапи дослідження тепло-масообмінних процесів в теплиці середнього об'єму. Створено комп'ютерну 3-D модель теплиці з габаритними розмірами 7000x4000x1600 мм, повітрообмін складає 1400 м³/год та для моделювання процесів встановлено змінні величини: тиск, температура, швидкість потоку повітря, параметри повітря та час. Модель описує тепличний об'єкт, як заданий об'єм повітря, обмежений стінами, дахом та підлогою. Біомаса тепличного об'єкта не враховується, вона є сталим значенням. Температурний режим в середині замкненого тепличного об'єму має бути рівномірним та сталим, незалежним від впливу зовнішніх факторів. Моделювання тепличного об'єкта проведено в пакеті Ansys та SOLIDWORKS. Для проведення досліджень було визначено зв'язок тепломасообмінних процесів в теплиці з середовищем моделювання. Для цього було виявлено основні

рівняння: аеродинамічних процесів, рівняння нерозривності стисливого середовища та рівняння переносу водяної пари. На першому етапі дослідження було проведено серію тестових експериментів: процес теплообміну в теплиці(розподіл температури), швидкість теплообміну та зміна тиску, а також час стабілізації температури, швидкості повітря. Другим етапом було дослідження теплообміну теплиці з навколишнім середовищем. Для цього по заданому прогнозу погоди було імітовано нагрів моделі теплиці до 20 °C після чого нагрів було вимкнено. Під дією зовнішнього середовища теплиця охолоджується, з відповідним процесом теплообміну теплиці з навколишнім середовищем. Наступним етапом було проведено дослідження стабілізації температури в середині теплиці при заданому прогнозу погоди. Для цього було взято попереднє дослідження та визначено час стабілізації температури в конкретний момент, що дає розуміння про втрату теплової потужності через стінки теплиці.

Наступним етапом було дослідження теплопередачі через огорожувальну конструкцію теплиці у навколишнє середовище. Для цього було імітовано нагрів моделі теплиці до 20 °C після чого нагрів було вимкнено. Дослідження проводилося в діапазоні зовнішньої температури від «-15 °C» до «+30 °C». З досліджень встановлено, що усереднене значення густини теплового потоку при охолодженні теплиці складає 138 Вт/м².

П'ятим етапом дослідження було розподілення водяної пари в середині замкненого об'єму тепличного об'єкта. Для цього було задано температуру вхідного повітря та його вологість впродовж доби відповідно до прогнозу погоди. По результатах дослідження було зроблено висновок, що максимальна концентрація водяної пара досягається при температурі зовнішнього середовища 20,7 °C. Для рівномірного зволоження наступним етапом дослідження було промодельована система розпилення через форсунка.

У п'ятому розділі наведено загальний алгоритм програми керування нагрівачами, який передбачає вмикання системи, оновлення значень керуючих змінних, опитування датчиків та оновлення стану системи, корегування констант

та загальне керування роботою виконавчих пристроїв. Розроблено режим роботи та програму керування форсунками. Для визначення режимів вмикання/вимикання форсунок було виконано розрахунок доданої витрати вологості. За результатами розрахунку, для компенсації втрати вологи в тепличному об'ємі, запропоновано використати три форсунки продуктивністю 2 л/год. Визначений термін вмикання форсунок регламентується накопиченим дефіцитом водяної пари. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 2,62 л/год. В алгоритмі керування форсунками передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплексу команд керування. Проведено порівняльний розрахунок ефективності мехатронної системи з упереджуючим керуванням. Обрано для порівняння базовий варіант з дискретним керуванням нагрівачами та системою з упереджуючим керуванням. Визначено, що добова сумарна витрата енергії за базовим варіантом складає 86,68 кВт, а добова сумарна витрата енергії за упередженим варіантом складає 71,3 кВт. Отже, для наведеного прикладу прогнозу добових змін температури оточуючого середовища економія споживання енергії системою обігріву складає 18%.

Ключові слова: пневмо-гідравлічна мехатронна система; повітряне і рідинне середовище; потік і тиск; перехідний процес; структура; привід; пристрої та обладнання; математична модель; прикладні програми чисельного розрахунку; алгоритми та режими керування; адаптація; діаграми ефективності.

ABSTRACT

Synytsyna Yelyzaveta. Hydropneumatic system of a medium-sized greenhouse facility. - Qualifying scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 131 Applied Mechanics - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2025.

Our country has long been famous for its high-quality agricultural products around the world. The reason for this fame is fertile soil and hardworking people. The products we grow cover not only the needs of the country but are also exported abroad. Unfortunately, not every country today can boast of such opportunities. Because the climate conditions are different and not all products can grow there. Greenhouses use mechanical microclimate control, which takes a lot of time to maintain and is economically unprofitable in terms of paying staff. For large areas, automatic systems are used, which, in turn, do not always cover the entire amount of information (climate conditions). Such systems usually do not work efficiently and cannot predict the system's performance when various external and internal parameters change.

Sudden changes in temperature and humidity have a negative impact on crop production. Modern methods of regulating the microclimate of greenhouse facilities are reduced to the simplest - controlling the flow rate, humidity and temperature of air masses. Therefore, the question arises of creating a universal system for growing agricultural products, namely, effective automation of engineering systems.

This thesis develops an automated mechatronic greenhouse microclimate system. The thesis consists of five chapters, the main content and results of each chapter are presented below.

The introduction substantiates the relevance of the thesis topic, defines the purpose and objectives of the study, presents the research methods, formulates the scientific novelty and practical value of the results, and presents data on the work's validation.

The first section provides an overview of the engineering systems of the greenhouse facility and their design features. A comparative analysis of greenhouses

in terms of their overall dimensions, complexity of installation, availability of engineering systems and control systems is carried out. The direction of research, main functions and features of greenhouse microclimate control systems are determined. Their advantages and disadvantages are identified; based on this analysis, the purpose and objectives of the dissertation are formulated.

In the second chapter, the basis for the development of the structure of the mechatronic system of a medium-sized greenhouse object is formed. The general functions of the microclimate system are considered and the requirements for the control system are determined. It is established that the air temperature inside the greenhouse should be in the range of 20-30 °C, the air humidity should be in the range of 60-90%, CO₂ should be kept at least to the outside level, and the wind speed and direction determine which ventilation window to open and how much to open in the greenhouse. Due to the transient processes of changes in speed, pressure, humidity, and temperature; changes and loss of thermal power of the greenhouse; changes and loss of air humidity in the greenhouse, the structure of the mechatronic system with a greenhouse model was proposed. It is proposed to divide the structure of the mechatronic system into subsystems. A schematic diagram of the ventilation and recirculation system was developed, and a system of air ducts 10 meters long and 360x360 mm in cross-section was designed and calculated. A fan with a maximum capacity of 1400 m³/h was selected. The torque was calculated and the force to be provided by the pneumatic actuator was determined to be 2360 N at 0.6 MPa when closing the damper and 2770 when opening it. The greenhouse heating system was calculated and a 5.0 kW heater was selected. A general scheme of actuators for the ventilation, curtaining, heating, and ventilation windows was developed. Calculated The paper analyzes the system of irrigation and humidification of the greenhouse, and establishes that the nozzle spray diameter is 2.5 meters, so to maintain a stable regime in the greenhouse, it is enough to use 3 nozzles during air recirculation. The general structure and computer model of the greenhouse facility are proposed.

In the third section, the physics of heat and mass transfer processes inside the greenhouse is studied in order to determine the requirements for the model of the

control object. The heat and mass transfer processes in a greenhouse based on the balance of air heat flows are theoretically substantiated. The heat losses through the polycarbonate greenhouse envelope are theoretically substantiated, taking into account its dimensions, and the overall heat transfer coefficient is determined. The equations of heat balance and aerodynamic processes were theoretically determined using the Navier-Stokes equation. For the numerical calculation of air movement according to the Navier-Stokes equation, the continuity equation for a compressible medium was added. The generalized process of water vapor transfer by air inside the greenhouse is theoretically considered. The tasks for the computer model are defined, namely: testing the model and determining changes in microclimate parameters; determining the fields of distribution of pressure, velocity, temperature, humidity over the greenhouse volume; obtaining predicted changes in parameters over a certain period of time.

Chapter 4 presents the stages of studying heat and mass transfer processes in a medium-sized greenhouse. A 3-D computer model of a greenhouse with dimensions of $7000 \times 4000 \times 1600$ mm, air exchange rate of 1400 m³/h was created and the following variables were set for modeling the processes: pressure, temperature, air flow rate, air parameters, and time. The model describes the greenhouse as a given volume of air bounded by walls, roof, and floor. The biomass of the greenhouse object is not taken into account; it is a constant value. The temperature inside the closed greenhouse volume should be uniform and stable, independent of the influence of external factors. The greenhouse object was modeled in Ansys and SOLIDWORKS. To conduct the research, we determined the relationship between heat and mass transfer processes in the greenhouse and the modeling environment. For this purpose, the following were identified equations: aerodynamic processes, the equation of continuity of a compressible medium, and the equation of water vapor transfer. At the first stage of the study, a series of test experiments were conducted: the process of heat exchange in the greenhouse (temperature distribution), heat exchange rate and pressure changes, as well as the time for stabilization of temperature and air velocity. The second stage was to study the heat exchange between the greenhouse and the environment. For this purpose, according to a given weather forecast, the greenhouse model was simulated

to be heated to 20 °C, after which the heating was turned off. Under the influence of the external environment, the greenhouse cools down, with the corresponding process of heat exchange between the greenhouse and the environment. The next step was to study the stabilization of the temperature inside the greenhouse under a given weather forecast. To do this, we took the previous study and determined the time of temperature stabilization at a particular moment, which gives an understanding of the loss of heat through the walls of the greenhouse.

The next step was to study the heat transfer through the greenhouse envelope to the environment. To do this, the greenhouse model was simulated to be heated up to 20 °C, after which the heating was turned off. The study was conducted in the range of ambient temperatures from -15 °C to +30 °C. The study found that the average value of the heat flux density when the greenhouse was cooled was 138 W/m².

The fifth stage of the study was the distribution of water vapor inside the closed volume of the greenhouse. For this purpose, the temperature of the incoming air and its humidity during the day were set according to the weather forecast. The study concluded that the maximum concentration of water vapor is achieved at an ambient temperature of 20.7 °C. For uniform humidification, the next stage of the study was to model a spray system through a nozzle.

Section 5 presents the general algorithm of the heater control program, which includes switching on the system, updating the values of control variables, polling sensors and updating the system state, adjusting the constants and general control of actuators. An operating mode and a nozzle control program were developed. To determine the nozzle on/off modes, we calculated the added humidity consumption. According to the results of the calculation, it was proposed to use three nozzles with a capacity of 2 l/h to compensate for the loss of moisture in the greenhouse volume. The determined period of injector switching on is regulated by the accumulated water vapor deficit. The average value of water vapor consumption to compensate for air humidity is 2.62 l/h. The nozzle control algorithm provides for turning on the fogging system, updating the current values of variables, polling sensors, and updating a set of control commands. A comparative calculation of the efficiency of the mechatronic system with

anticipatory control was performed. The basic variant with discrete control of heaters and the system with proactive control were chosen for comparison. It was determined that the daily total energy consumption for the baseline variant is 86.68 kW, and the daily total energy consumption for the anticipatory variant is 71.3 kW. Consequently, for the above example of predicting daily changes in ambient temperature, the energy consumption of the heating system is saved by 18%.

Keywords: pneumatic-hydraulic mechatronic system; air and liquid medium; flow and pressure; transient process; structure; drive; devices and equipment; mathematical model; numerical calculation applications; control algorithms and modes; adaptation; efficiency diagrams.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

- **Синицина Є., & Губарев О. (2023).** «Модель об'єкту керування мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму» - *Mech. Adv. Technol.* Vol. 7, No. 3, 2023, pp. 330–336. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.290773 (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Космина С.. (2024).** «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - *Mech. Adv. Technol.* 8, вип. 2(101), с. 164–171, Чер 2024. DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).298506_ (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Губарев О. (2024).** «МЕХАТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ» - Вісник машинобудування та транспорту, Т. 10, №2, с. 38-47, 2024, DOI: 10.63341/vjmet/2.2024.38 (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Губарев О.** «Прогнозування температури в тепличних об'єктах» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2021 <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/232673> - ст. 222-225, 2021 рік.
- **Синицина Є., & Губарев О.** Технічна конференція XXI МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» з темою «АДАПТИВНА ГІДРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА МІКРОКЛІМАТУ АВТОНОМНОГО ТЕПЛИЧНОГО ОБ'ЄКТУ» http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/2020/Program_2020.pdf - ст.21, №5, 2020 рік.
- **Синицина Є., & Губарев О.** «Особливості вентиляції тепличних об'єктів» Єлизавета Юріївна Синицина, Олександр Павлович Губарев, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” <http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24536>

- **Синицина Є., & Губарев О..** Забезпечення вхідними даними смарт системи мікроклімату телиці малої площі, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”
<http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24532>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** Вплив матеріалів на регулювання температурного режиму тепличного об’єкту. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА,
<https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>, 2022р.
- **Синицина Є., & Губарев О.,** Моделюванню процесів тепло - та масообміну в тепличному об’єкті. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА
<https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «Гідропневматична смарт-система об’єкта тепличного господарства малого та середнього об’єму», Міжнародна науково-технічна конференція - ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ_ <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023/paper/view/18239>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2024 <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30513>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ФОРСУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ В ТЕПЛИЧНОМУ ОБ’ЄКТІ» - IV Міжнародна наукова конференція «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень», ст. 196, 18.10.2024; Вінниця, України,
<https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/18.10.2024/19>

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1.АКТУАЛЬНІСТЬ З ВИЗНАЧЕННЯМ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
1.1.Загальні відомості про інженерні системи тепличного об’єкта	26
1.2.Конструктивні особливості об’єкта тепличного господарства.....	33
1.3.Порівняльний аналіз об’єктів тепличного господарства.....	39
1.4.Основні функції систем управління мікрокліматом.....	41
1.5.Особливості автоматизованих систем управління мікрокліматом.....	42
1.6.Мета та задачі роботи.....	50
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛИЧНОГО ОБ’ЄКТА СЕРЕДНЬОГО ОБ’ЄМУ.....	51
2.1.Загальні функції та структура мехатронної системи мікроклімату теплиці	51
2.2.Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система вентиляції та рециркуляції.....	57
2.3.Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система провітрювання вікон та вентилятор. Розрахунок системи провітрювання вікон.....	58
2.4.Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система обігріву. Розрахунок теплової потужності нагрівачів. Схема виконавчих пристроїв підсистеми.....	63
2.5.Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система зволоження повітря в тепличному об’єкті. Розрахунок продуктивності та кількості форсунок.....	66
2.6.Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система поливу в тепличному об’єкті. Гідравлічний розрахунок системи поливу.....	69
2.7.Загальну структуру та комп’ютерна модель тепличного об’єкта.....	81
Висновки по розділу.....	82

РОЗДІЛ 3. ЗАДАЧІ ТА ВИМОГИ ДО ПНЕВМО-ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ	83
3.1. Фізика тепло-масообмінних процесів в середині тепличного об'єкта.....	83
3.2. Задачі для комп'ютерного моделювання теплиці середнього об'єму.....	94
3.3. Вимоги до моделювання та комп'ютерної моделі теплиці.....	95
Висновки по розділу.....	96
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО-МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕПЛИЦІ СЕРЕДНЬОГО ОБ'ЄМУ.....	98
4.1. Комп'ютерна модель тепличного об'єкта.....	98
4.2. Тестові випробування для підтвердження адекватності моделі.....	100
4.3. Дослідження теплової потужності теплиці.....	112
4.4. Дослідження втрати теплової потужності теплиці через огорожувальну конструкцію	119
4.5. Дослідження втрати вологості повітря в середині тепличного об'єкта.....	123
4.6. Дослідження перетікання рідини та розпилення форсунки.....	128
Висновки по розділу.....	130
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА АЛГОРИТМА КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ ПНЕВМО-ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ МІКРОКЛІМАТУ.....	132
5.1. Загальний алгоритм програми керування нагрівачами.....	132
5.2. Режим роботи нагрівачів та програма керування.....	133
5.3. Режим роботи форсунок	136
5.4. Загальний алгоритм та програма керування форсунками	138
5.5. Порівняльний розрахунок ефективності мехатронної системи з упереджуючим керуванням.....	143
Висновки по розділу.....	145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	147
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	151
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	164
ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОНАЧИХ ПРИСТРОЇВ.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

λ - коефіцієнт тертя;	Q_{ϕ} - продуктивність форсунок, л/год;
L – довжина повітропроводу, м;	T_1 - температура водяної пари, °C;
d – діаметр повітропроводу, м;	Δt_1 – час роботи форсунок, год;
v – швидкість потоку повітря, м/с;	30 – кратність повітрообміну;
ρ – густина повітря, кг/м ³ ;	V – об’єм повітря, м ³ ;
c – теплоємність повітря, кДж/кг*°C;	S – площа поперечного перерізу, м ² ;
t_{np}, t_n – температура повітря на вході та виході з калорифера, °C;	T_2 - температура припливного повітря, °C;
G - масова витрата повітря, кг/с;	ϕ – вологість припливного повітря, %;
H - висота розпилення,м;	Δt_2 - час роботи вентилятора, год;
$T_b - T_n$ – перепад температури повітря, °C;	ϕ_t – задане початкове значення вологості, %;
$Q_{max n}$ – максимальна витрата на напірній лінії, м ³ /год;	$Q_{надх}$ – теплові надходження від системи обігріву, кВт;
V_n – середня швидкість потоку рідини на напірній лінії, м/с;	N_{inf} - кількість змін інфільтрованого повітря за годину;
$G_{тепл}$ – витрати теплоносія, кВт;	F – площа огорожі, м ² ;
$T_{поч}, T_{кін}$ – температура теплоносія на вході і виході теплообмінника, °C;	k – коефіцієнт теплопередачі полікарбонату, Дж/м ² ;
$C_{тепл}$ – питома теплоємність, Дж/кг·K;	$Q_{свіж}$ – втрати теплоти на обігрів свіжого повітря, кВт;
h_{c-am} – коефіцієнт теплопередачі між покриттям теплиці та внутрішнім повітрям теплиці;	h_{s-a} – коефіцієнт теплопередачі між ґрунтом та внутрішнім повітрям теплиці;
T_b – температура повітря всередині теплиці, °C;	T_n – температура повітря зовнішня, °C;
T_s – температура поверхні ґрунту, °C;	$Q_{втрати}$ – втрати теплоти, кВт;
c_p - теплоємність краплі (Дж/кг*K);	C_p - поправочний коефіцієнт;

\bar{u} - середня швидкість руху повітря всередині теплиці, м/с;	h_{inf} – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м ² К;
q_{c-sky} - коефіцієнт огляду між покриттям і зовнішнім середовищем;	A_c – площа поверхні тепличного покриття, м ² ;
r – термічний опір, м ² ·К/Вт;	ϵ_c - поверхнєве випромінювання;
$G_{свіж}$ - витрата свіжого повітря для вентиляції теплиці (кг/с);	F_{c-sky} – коефіцієнт огляду між покриттям та небом;
T_p - температура краплі, °С;	σ - постійна Стефана-Больцмана;
λ_s - коефіцієнт теплопровідності ґрунту, м ² *К/Вт;	h_r – коефіцієнт радіаційної теплопередачі, м ² *К/Вт;
Q_{c-a} – конвективний тепловий потік від покриття до внутрішнього повітря, Вт;	q_{v-c} - чистий обмін тепловим випромінюванням між водяною парою та покриттям, Вт;
S_n - чистий потік сонячної радіації на поверхні ґрунту, Вт;	T_{∞} - температура ґрунту на певній глибині Н (м), °С;
q_n - чистий потік теплового випромінювання на поверхні ґрунту;	T_a – температура внутрішнього повітря теплиці, °С;
$X(t)$ – абсолютна вологість повітря в атмосфері теплиці, кгводи/кгповітря;	D - струмопровідний потік в глибину ґрунту;
S_a - сонячне випромінювання, поглинене покриттям, Вт;	h - коефіцієнт конвективного теплообміну (Вт/м ² /К);
N - молярний потік пари, мольм ⁻² с ⁻¹ ;	T_{∞} - температура суцільної фази, °С;
k_c - коефіцієнт масопередачі, м с ⁻¹ ;	h_{fg} - прихована теплота, Дж кг ⁻¹ ;
$C_{i,s}$ - концентрація пари на поверхні краплі, мольм ⁻³ ;	$dm_p=dt$ - швидкість випаровування, кг/(с·м ²);
$C_{i,\infty}$ - концентрація пари в повітрі, моль м ⁻³ ;	ϵ_p - випромінювальна здатність частинок (безрозмірна);
S_a - сонячне випромінювання, Ват/м ² ;	P_{op} - робочий тиск, Па;
$C_{пов}$ - питома теплоємність повітря, Дж/кг·град;	T_b – температура повітря всередині теплиці, °С;

T_{∞} - місцева температура повітря, °C;
 $T_{\text{н}}$ - температура повітря зовнішня, °C;
 ρg^x - гравітаційний член;
 μ - динамічна в'язкість середовища, Па·с;
 $W_X * \frac{dT}{dx} + W_Y * \frac{dT}{dy} + W_Z * \frac{dT}{dz}$ - конвективний член;
 P - тиск, Па;
 ΔH_{plant} - зміна вологи за рахунок транспірації рослин, кг/м³;
 e_a - тиск пари, Па;
 RH_{outside} - відносна вологість припливного повітря, %;
 AH_{outside} - абсолютна вологість припливного повітря;
 AH_{inside} - абсолютна вологість припливного повітря в теплиці, кгводи/кгповітря;
 e_w - тиск насиченої пари, Па;
 RH_{outside} - відносна вологість повітря в теплиці, %;
 T_{outside} - температура зовнішнього повітря, °C;
 T_{inside} - температура повітря в теплиці, °C;
 m_k - маса краплі, кг;
 $D(\theta)$ - коефіцієнт дифузії пари повітря;
 α - кут розпилення, °;
 g - прискорення вільного падіння, м/с²;
 r_k - радіус краплі, м;
 $W_X W_Y W_Z$ - векторне поле швидкостей;
 $\frac{d^2 W_X}{dx^2} + \frac{d^2 W_X}{dy^2} + \frac{d^2 W_X}{dz^2}$ - дисипативний член;
 t - час, год;
 ΔH_{air} - зміна пари, спричинена вентиляцією, кг/м³;
 RH - відносна вологість, %;
 ρ_v - маса пари на кубічний метр повітря (кг/м³);
 $X_{\text{внтр}}$ - абсолютна вологість повітря (кгводи/кгповітря);
 Q_{s-a} - конвективний тепловий потік від поверхні ґрунту до внутрішнього повітря, Вт;
 $G_{\text{свіж}}$ - витрата свіжого повітря, кг/с;
 $X_{\text{свіж}}$ - абсолютна вологість свіжого повітря, кгводи/кгповітря;
 Δt - тривалість поточного вмикання форсунок, хв;
 $X(t)$ - абсолютна вологість повітря в атмосфері теплиці (кгводи/кгповітря);
 $P_{\text{н}}, P$ - парціальний тиск пари, Па;
 $\frac{dp}{dx}$ - зміна тиску в потоці;

m_w , – молекулярна вага води у
газоподібному стані, кг;

F_c – поверхня заклоєної теплиці, м²;

K_d - функція добових витрат
вологості відповібно результатів
моделювання

$G_{\text{пар}}$ – витрата пара, кг/с;

$t_v - t_p$ – температура води та повітря
теплиці, °C;

F_t – поверхня теплообміну, м²;

k_1, k_2 – коефіцієнти теплопередачі
через стінку та матеріалу поверхні
теплиці;

$G_{\text{вир}}$ – витрата повітря, кг/с.

ВСТУП

Актуальність теми

Гарантоване збільшення виробництва сільськогосподарських продуктів, зокрема овочів, фруктів та зелені, безпосередньо пов'язано з збільшенням площ та продовженням терміну використання тепличних господарств. Додатковим чинником розширення тепличних господарств є підвищення цін від імпортерів виробників, які найчастіше виграють і за ціною, і за якістю. Основною перевагою тепличних об'єктів є вирощування продуктів майже цілий рік незалежно від зовнішніх кліматичних умов. Важливішою характеристикою тепличних об'єктів є якісна система мікроклімату, яка відповідає комплексу вимог. Другим за вагою показником ефективності теплиці є адаптація мікроклімату до змін параметрів навколишнього середовища. Враховуючи, що ці зміни параметрів мають річний та добовий цикл і постійно впливають на теплицю, є можливість, шляхом адаптації, підвищити продуктивність, ефективність та якість продукції.

Як засвідчила практика, використання адаптивних централізованих систем мікроклімату для тепличних господарств великих об'ємів не виправдане, бо через значну площу і об'єм підтримання сталого режиму мікроклімату в середині всього об'єму є збитково вартісним. Також у теплицях великих об'ємів підвищені вимоги до знезараження рослин і ґрунтів, що ставить обмеження на роботу автоматизованих підсистем. Досвід використання адаптивних систем на основі нейронних мереж базується на статистичних відомостях і усереднених показниках, що не дозволяє враховувати теплоомасообмінні процеси в середині теплиці при розробці алгоритму керування. Це обумовлено: великою площею теплиці; відсутністю стабілізованих параметрів температури та вологості повітря у всьому об'ємі; невизначеним алгоритмом керування, що обумовлений змінами параметрів зовнішнього середовища без врахування теплоомасообмінних процесів в середині теплиці; значною вартістю тепличного об'єкту. Зняття цих обмежень або зменшення їх впливу для теплиць середнього об'єму дозволить забезпечити підвищення продуктивності тепличного господарства.

Використання адаптивних систем на основі мехатронної системи з пневмо-гідравлічними виконавчими пристроями дозволить зменшити вартість теплиці та має значні потенційні можливості для розширення терміну експлуатації та підвищення якості системи мікроклімату.

Актуальною задачею є розроблення адаптивної мехатронної системи мікроклімату теплиці, яка спроможна стабілізувати та підтримувати сталий мікроклімат при змінах параметрів зовнішнього середовища в визначеному діапазоні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано в рамках складової частини «Ресурсоефективне та чисте виробництво (РЕЧВ)» програми "Європейський Союз для довкілля" (EU4Environment) для країн Східного партнерства.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення енергоефективності теплиці шляхом створення автоматизованої мехатронної системи з упереджувачим алгоритмом багатofакторного адаптивного керування на основі моделі тепло-масообмінних процесів.

Задачі:

1. Проаналізувати відомі технічні рішення щодо складу, функціонування та особливостей систем мікроклімату тепличних об'єктів.
2. Теоретично обґрунтувати функції та особливості протікання тепло-масообмінних процесів в теплиці та їх зв'язки з параметрами оточуючого середовища.
3. Розробити загальну структуру об'єкту дослідження.
4. Розробити математичну та комп'ютерну модель робочих процесів в теплиці, придатну для моделювання процесу функціонування теплиці впродовж тривалого часу.
5. Провести модельні дослідження розповсюдження масових потоків, вологості і теплових потоків та стабілізації параметрів по об'єму з можливістю визначення функції дефіциту потужності теплового потоку впродовж доби з врахуванням впливу зовнішнього середовища.

6. Розробити загальну структуру гідро-пневматичної системи мікроклімату та її раціональне розташування в теплиці.
7. Підібрати виконавчі пристрої, засоби контролю і керування.
8. Розробити систему керування, алгоритм та програму для керування виконавчими пристроями.
9. Виконати порівняльну оцінку енергоефективності розробленої мехатронної системи мікроклімату.

Об'єктом дослідження є: автоматизована мехатронна система мікроклімату теплиці.

Предметом досліджень є: процес створення і підтримки заданих показників повітрообміну, температури, вологості з обмеженнями по швидкості повітряних потоків, регулюванню теплообміну з оточуючим середовищем, межових значень температури і вологості.

Методи дослідження

Враховуючи складну взаємодію між параметрами температури та вологості повітря в середині теплиці, комплексним впливом параметрів зовнішнього середовища, інженерних систем та умов експлуатації для дослідження тепломасообмінних процесів використано метод математичного моделювання. Коректність і точність розробленої математичної моделі визначались методом порівняння тестових результатів моделювання з відомими експериментальними даними. Оцінка ефективності розробленої мехатронної системи виконувалась на основі результатів модельних експериментів відповідно до прогнозу погоди.

Для проведення моделювання робочих процесів в теплиці, обробки отриманих результатів, побудови діаграм, графіків та розрахунку параметрів було використано відповідні програми: Ansys Fluent 2021, SOLIDWORKS Flow Simulation 2022, Microsoft Excel 2019, FluidSIM, CoDeSys.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Вперше науково обґрунтовано і розроблено структуру мехатронної системи керування мікрокліматом теплиці середнього об'єму в якій використано упереджуюче керування змінами температури і вологості, з використання акумулюючої спроможності теплиці, на основі прогнозованого дефіциту потужності теплового потоку і прогнозованого дефіциту вологості повітря, що враховують прогноз змін параметрів зовнішнього середовища.

2. Вперше розроблено методiku і її реалізацію засобами комп'ютерного моделювання, яка дозволяє визначати добову функцію прогнозованого дефіциту

потужності теплового потоку впродовж доби з врахуванням зовнішнього впливу температури повітря, енергії випромінювання та тепломасообмінного процесу в системі провітрювання в діапазоні температур від -15°C до $+30^{\circ}\text{C}$.

3. Вперше розроблено методику і її реалізацію засобами комп'ютерного моделювання, яка дозволяє визначати добову функцію прогнозованого дефіциту вологості в теплиці впродовж доби на основі змін температури оточуючого середовища та доданої чи вилученої кількості пари через системи провітрювання та зволоження за відомим регламентованим значенням або графіком змін вологості в теплиці.

4. Вперше доведено, що упереджуваче керування в мехатронній системі мікроклімату теплиці середнього об'єму, яке узгоджує функціонування підсистем провітрювання, рециркуляції, зволоження, поливу і обігріву для умов середньої полоси України може забезпечувати до 20% заощадження енергії за рік та зниження встановленої потужності в системі обігріву на 12 ... 26%.

5. Встановлено, шляхом моделювання, що термін стабілізації поля швидкостей в теплиці середнього об'єму має нелінійну залежність від швидкості вхідного потоку і в діапазоні швидкостей від 0,2 до 1,06 м/с становить від 30 секунд до 6 хвилин.

Практичне значення одержаних результатів

1. Запропонована мехатронна система керування тепловим і повітряним потоком та потоком вологості дозволяє розширити діапазон допустимих змін параметрів зовнішнього середовища теплиці функціонування системи мікроклімату при збереженні енерговитрат за рахунок накопичення буферного запасу теплової енергії чи надлишкового зволоження повітря в межах допустимих відхилень відповідно до прогнозу змін параметрів зовнішнього середовища, на прикладі прогнозу добових змін температури ($7 \dots 23^{\circ}\text{C}_{\text{о}}$) діапазон може бути розширеним до ($4 \dots 25^{\circ}\text{C}_{\text{о}}$) шляхом корегування алгоритму керування замість встановлення додаткових потужностей.

2. Розроблений упереджувачий алгоритм керування мехатронною системою мікроклімату дозволяє використовувати два нагрівачі сталої потужності і дискретне керування тепловими потоками з адаптацією до усередненої потужності шляхом зміни співвідношень часу розігріву і часу простою нагрівачів, що забезпечило зниження встановленої потужності на 12%, а саме двох обігрівачів потужністю 3 і 1 кВт замість трьох нагрівачів потужністю 3, 1,5 і 1,0 кВт, із адаптивним графіком їх випереджувачого підключення впродовж доби, що дозволяє обігрівати теплицю по двозональному тарифу за електроенергію і є економічно вигідним під час експлуатації тепличного об'єкту в холодний період року.

3. Отримані за результатами моделювання тепломасообмінних процесів з 3-D моделі теплиці середнього об'єму залежності дозволяють

визначати час стабілізації локальних і усереднених значень поля швидкостей в теплиці середнього об'єму в залежності від витрати та швидкості доданого повітряного потоку, які складають для швидкості до 60 секунд для локальних змін і до 15 секунд для усереднених значень для діапазону доданого повітряного потоку від 0,2 до 1,5 м/с та витрати від 1.5 до 3,7 м³/хв.

4. Розроблена методика розрахунку регулятора витрати заслоночного типу дозволяє визначати достатнє зусилля пневматичного приводу і підбирати виконавчі і керуючі пристрої з врахуванням характеристик мережі воздухопроводу і характеристик джерела повітряного потоку та з врахуванням кратності повітрообміну.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота виконувалась під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора Губарева О.П., основні теоретичні та модельні експериментальні результати були отримані автором самостійно. Серед них аналіз відомих технічних рішень систем адаптації мікроклімату, розробка математичної моделі з параметрів мікроклімату, валідація математичної моделі, модельні дослідження тепло-масообмінних процесів, обробка експериментальних даних та розроблення алгоритму керування виконавчими пристроями обігріву та зволоження. При постановці задачі дослідження та формулюванні наукових ідей, аналізі та обґрунтуванні отриманих результатів, а також при формуванні структури дисертаційної роботи були отримані ключові керівні рекомендації від наукового керівника.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях і семінарах.

XXI МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2020р.).

Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні» (м. Київ, 2021р., 2024р.).

XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, 2021р.).

XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПП «ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА» (м. Київ, 2022р.).

Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ» (м. Київ, 2023р.).

IV Міжнародна наукова конференція «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень» (м. Вінниця, 2024 р.).

Повні результати роботи дисертації доповідалися та обговорювалися на семінарі кафедри «Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки» КПІ ім. Ігоря Сікорського (м. Київ, 2025 р.).

Публікації

За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 3 статті в наукових фахових виданнях України; 9 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації

Ця дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок, в тому числі основного тексту 121 сторінка, 71 рисунок, 14 таблиць і список використаних джерел із 105 бібліографічних найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ З ВИЗНАЧЕННЯМ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальні відомості про інженерні системи тепличного об'єкта

Система зашторювання. Система зашторювання (рис.1.1) дозволяє зменшити перегрів повітря в середині теплиці. Теплиці в яких є дана система підтримується стала та комфортна для рослин температура, підвищується вологість повітря по всій площі, при цьому зберігається процес провітрювання. Система зашторювання включає в себе: шторний екран; систему механізмів. Система буває двох типів: горизонтального та вертикального. Горизонтальна система зашторювання промислової теплиці буває тросового і рейкового виконання. При використанні рейкового виконання можливі варіанти одинарного або подвійного зашторювання. Горизонтальну систему зашторювання з полімерним екраном можна влаштувати у всіх відділеннях промислової теплиці в кожному прольоті. При одинарному зашторюванні вона розташовується між верхніми поясами ферм [1,9,11].



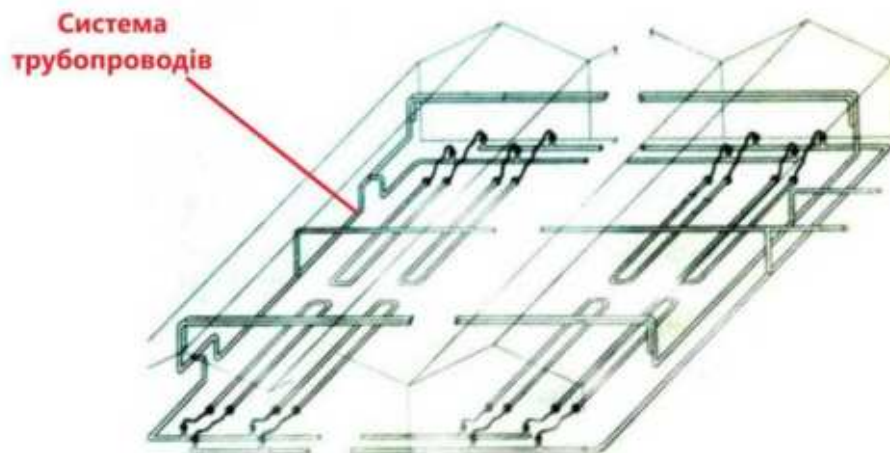
Рис.1.1. Система зашторювання: 1- шторний екран; 2 – механізм зашторювання

Система зашторювання працює на відкриття-закриття дистанційно від кнопок або в автоматичному режимі від системи управління мікрокліматом теплиці [1,9,11].

Система опалення. Зазвичай система опалення промислової теплиці (рис.1.2) складається з: джерела теплового постачання та тепломережі. Система опалення теплиць забезпечує відповідний температурний режим у замкненому об'ємі теплиці відповідно до вимог мікроклімату для певного виду продукції. Тепловим носієм в системі опалення зазвичай використовують воду.



а



б

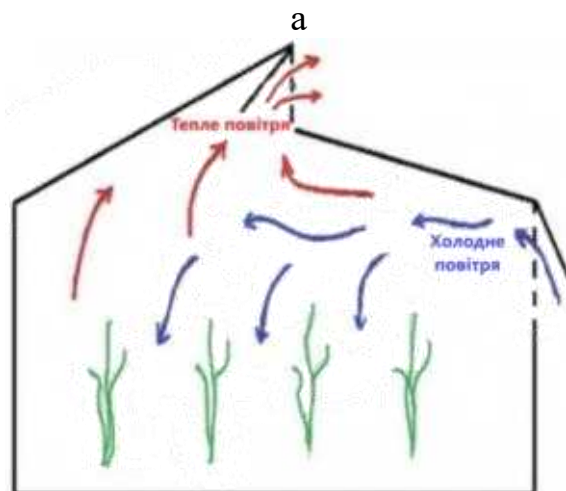
Рис.1.2. Система опалення: а - джерела теплового постачання; б – схема тепломережі (система трубопроводів)

У джерелах теплового постачання (котельні) відбувається нагрів теплового носія. У контурах обігріву (системах трубопроводу) передбачені вузли регулювання температур, які забезпечують необхідне значення температур теплоносія. В системі опалення використовуються сталеві труби. [1,2,9].

Система рециркуляції повітря. Система рециркуляції (рис.1.3) в теплиці призначена для штучного перемішування потоків повітряних мас з метою досягнення більш рівномірного розподілу температури та вологості повітря по всьому об'єму теплиці зниження перегріву рослин, активізації біологічних процесів у рослинах, ліквідації зон з підвищеною вологістю особливо в періоди, коли природна вентиляція через кватирки є неможливою чи малоефективною [1,9, 12]. Система рециркуляції складається з осьових вентиляторів і електротехнічного обладнання. Робота системи здійснюється в автоматичному режимі [9].



а



б

Рис.1.3. Система рециркуляції: а – осьовий вентилятор для рециркуляції повітря; б - схема руху повітряних потоків

Система водопостачання. Промислові теплиці комплектуються системами водопостачання (рис.1.4). У теплиці передбачається обладнання для водопостачання та каналізації, а саме: система поливального водопроводу, система господарсько-питного водопроводу, система крапельного поливу рослин (чи іншого), система резервного поливу з шлангів, система випарного охолодження, система внутрішніх водостоків, система технологічного дренажу, система виробничої каналізації [1,3,8,9].

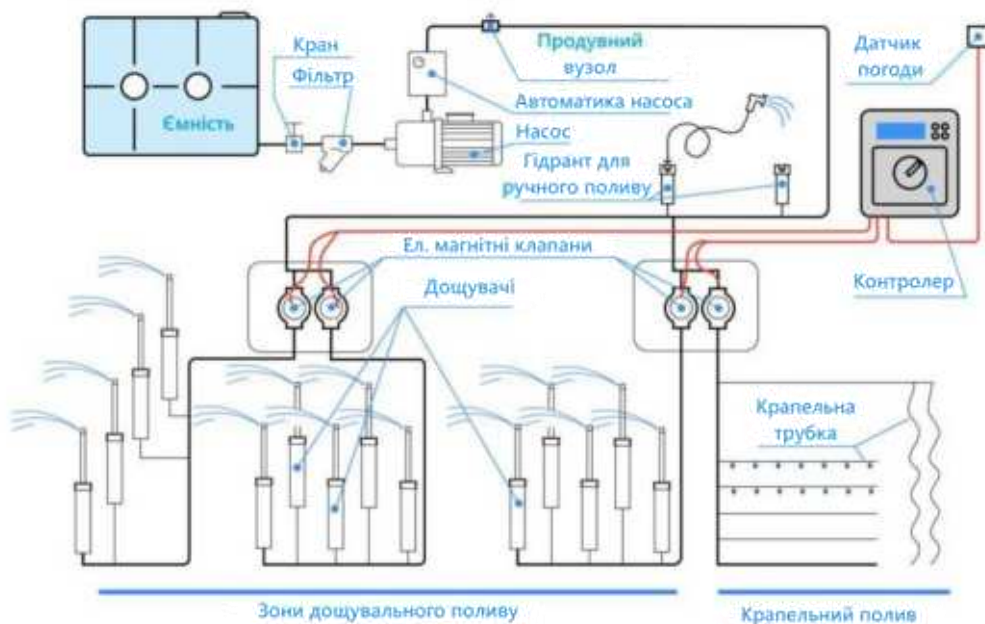
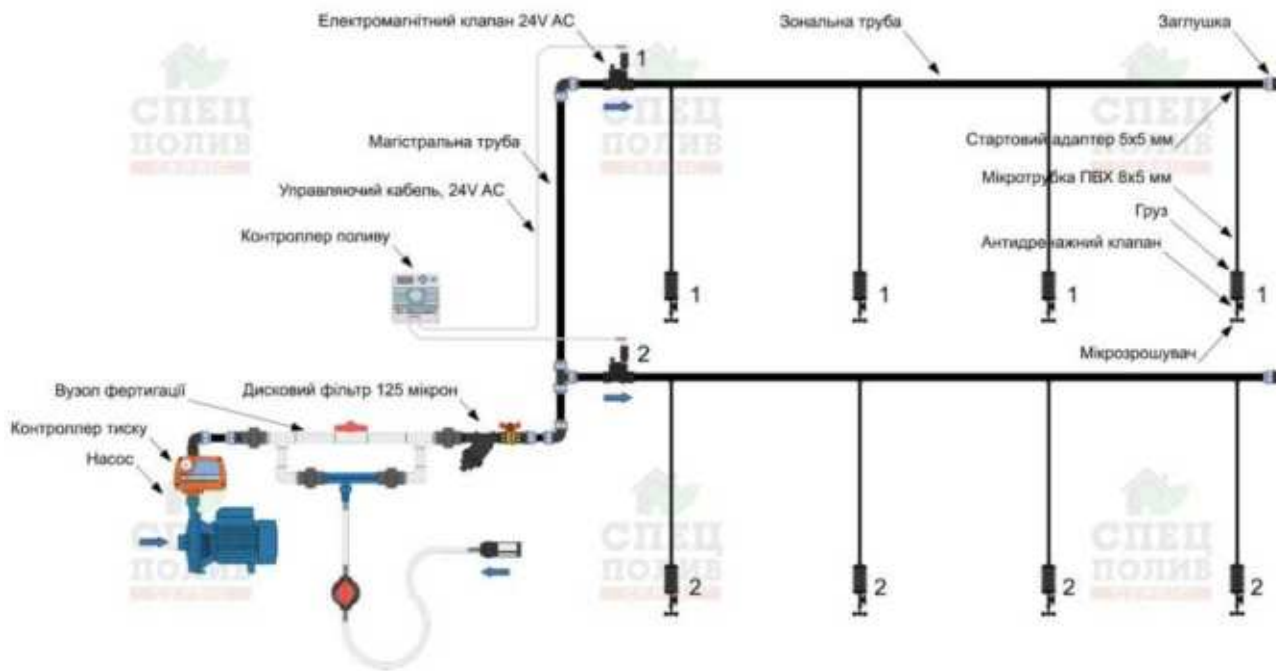


Рис.1.4. Загальна схема системи водопостачання

Система випарного охолодження і зволоження (туманоутворення) повітря. Система випарного охолодження (рис.1.6) і зволоження повітря необхідні для зниження температури повітря в теплиці на 5...7⁰С нижче температури зовнішнього повітря за рахунок адіабатичного поглинання тепла при випаровуванні дрібнодисперсної вологи, яка подається в теплицю. Установка системи випарного охолодження і зволоження складається з: ємності, насосів, запірної арматури, механічного фільтра.



а



б

Рис.1.6. Система випарного охолодження і дозволоження: а – загальний вигляд; б – принципова схема

Система туманоутворення потребує подачі води з постійним тиском від 3 до 5 бар. Джерело води може бути всередині або зовні теплиці, безпосередньо від свердловини/водопроводу. За необхідності підвищення тиску рекомендується встановити резервуар з водою з достатнім запасом води та насос, який буде створювати тиск від 3 бар (максимальний напір насоса має бути від 35 метрів) [1,8,9,13].

Система внутрішніх водостоків. Система внутрішніх водостоків (рис.1.7) призначена для відводу з покрівлі промислової теплиці зливових і талих вод. Схема системи внутрішніх водостоків виконується відповідно до пропускної здатності стояків і підземних трубопроводів. Відвід стоків з покрівлі

виконується за допомогою приймальних воронок. У теплицях де висота колон 4,5 і 5,0 м водовідведення здійснюється по колонах [4,9,14].



Тепличний жолоб для дренажної системи багатопрогнових теплиць

Рис.1.7. Система внутрішніх водостоків

Системи електроосвітлення. Управління досвітленням теплиці здійснюється в автоматичному режимі центральним кліматичним комп'ютером - у відповідності з заданими параметрами, з урахуванням рівня зовнішньої сонячної радіації і часу доби.



Рис.1.8. Системи освітлення

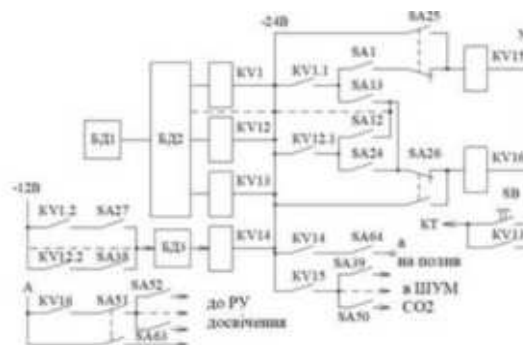
Розташування світильників по площі промислової теплиці залежить від конструктивних параметрів теплиці: ширини прольоту, висоти ферми, висоти кріплення лотків, розрахункової висоти верхньої точки росту рослин та інші [5,9, 15].

Рівень штучного освітлення у теплиці може бути в межах від 6 000 до 24 000 Лк і визначається в залежності від виду рослин і особливостей технологій вирощування. Живлячі і розподільчі електричні мережі (рис.1.8) виконуються кабелем. Прокладання кабелю здійснюється в лотках і по конструкціях теплиці.

Система підживлення рослин вуглекислим газом. Для забезпечення потреби промислових теплиць в подачі вуглекислого газу та підтримання його концентрації на рівні 400 – 1000 ppm - передбачають використання відхідних (димових) газів котельні. Система відбору вуглекислого газу (рис.1.10) від димової труби газової котельні виконується у відповідності з діючими нормативними документами в Європі та Україні [1,9, 16].



а



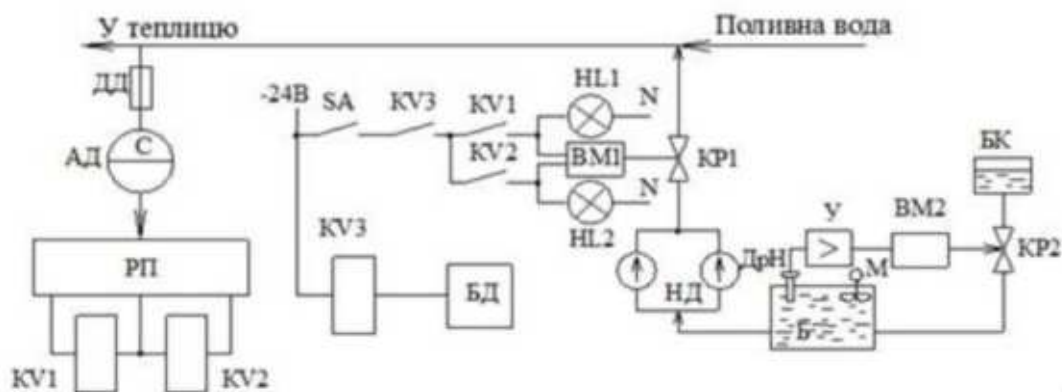
б

Рис.1.10. Система відбору вуглекислого газу

Система підживлення рослин мінеральними добривами. Система автоматичного керування підживленням рослин концентрацією розчину мінеральних добрив (рис.1.11) призначена для контролю концентрації та стабілізації її в межах, заданих агротехнічними вимогами [1,6,9].



а



б

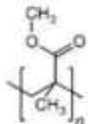
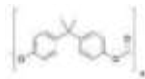

Рис.1.11. Система підживлення рослин мінеральними добривами: а – зовнішній вигляд системи; б – схема автоматичного керування концентрацією мінеральних добрив

1.2. Конструктивні особливості об'єкта тепличного господарства

На мікроклімат замкнутого об'єму теплиці впливає матеріал з якого виготовлена сама теплиця [5,10,11]. При низьких показниках теплопровідності матеріалу відбувається зниження температури в середині теплиці в холодний

період року та збільшення у теплий період. У таблиці 1.1 наведено результати порівняння різних типів матеріалу для виготовлення тепличного об'єкту[5,101].

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика матеріалів для скління теплиць

Показники характеристики матеріалу	Скло (6мм)	Стільниковий полікарбонат (6 мм)	Плівка (180 мікрон)
Структурна формула			
Ударна стійкість, Дж	0,05 Дж	2,1 Дж	Дуже низька
Строк служби	До 50 років	Не менше 10 років	5 років
Вага, кг / кв. м	10	1,3	0,19
Ступінь прозорості, %	89-92	86	89-93 (Одинарний поліетилен) 79-87 (Подвійний поліетилен)
Теплоізоляція, Вт / м ² х °С	185	8	4 000
Коефіцієнт теплопередачі, Вт / м ² х °С	5,8	3,7	3,6
Теплопровідність, Вт / м ² х °С	0,72-0,9	0,14	—
Діапазон температури застосування	-70 +250	-45 +120	-40 +90
Хімічна стійкість	Висока	Середня	Низька
Наявність ефекту «лінзи»	Є	Немає	Немає
Зручність у будівництві, умови монтажу	Вимагає обережності, трудомістка обробка	Легкий у різанні і вирубці, свердлінні й штампуванні	Має особливості

Отже, можна зробити висновок, що полікарбонат – це матеріал, який з'єднав в собі переваги скла і плівки. Він набагато перевершує їх по міцності, добре проводить світло і зберігає тепло, а також затримує шкідливі сонячні промені. Завдяки своїй гнучкості може бути використаний при виготовленні покриттів для конструкцій будь-якої форми. Для покриття конструкцій закритого ґрунту використовується стільниковий полікарбонат.

Типи теплиць та їх особливості. Проаналізовано типи конструкцій та види теплиць, а також їх особливості. Існує велика кількість теплиць різних видів і форм [3,4,10,11]:

1. Односкілі - ідеально підходять для ділянок з невеликою площею (рис.1.12).

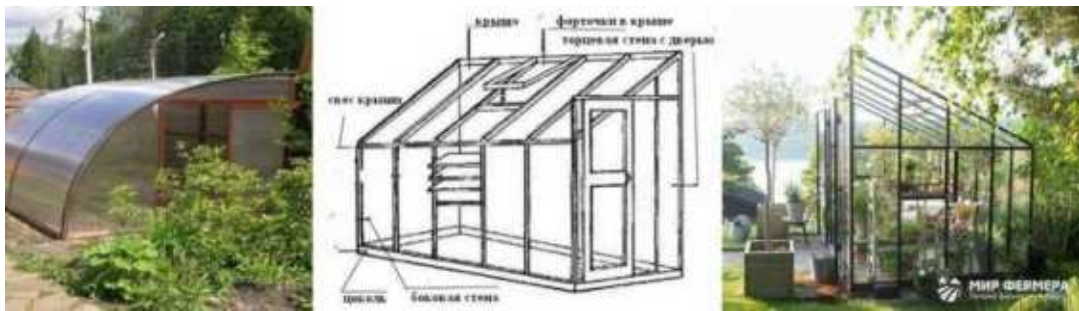


Рис.1.12. Види односкілих будівель

Ці теплиці можна прилаштувати з будь-якого боку будівлі, але краще, щоб скат даху був направлений в південну сторону. Серед мінусів даного типу теплиці є труднощі при покритті даху плівкою: робити це потрібно тільки в суху безвітряну погоду. Найкраще покрити таку теплицю склом або пластиком. Односкіла шатрова модель з полікарбонату значно дешевше, оскільки не є самостійною спорудою, а примикає до однієї зі стін будівлі. Несучою конструкцією односкілим теплиці є полуферма. Її будують з обрізних дошок або брусів, міцність та стійкість конструкції залежить від з'єднання ската даху з бічною стінкою. У місці стику в конструкції та будівлі влаштовують ромбоподібні пази. Зазвичай рослини в такій теплиці вирощують на полицях з дошок [3,4,10,11].

2. Подвійні – це конструкції теплиці, які схожі на «будиночки», їх легко будувати власноруч.

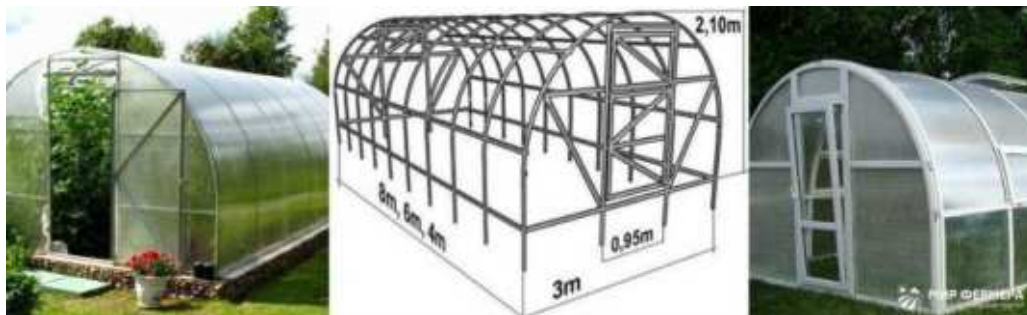


Рис.1.13. Фото і креслення двосхилим теплиць

Така споруда має ряд переваг: по-перше, вона не зламається під вагою снігу взимку; по-друге, форма даху дає можливість більш широкого вибору матеріалу для її покриття – від скла до пластикових пляшок; по-третє, з'являється можливість додаткової стилізації (рис.1.12) [10,11]. До недоліків відносять: оскільки огорожувальна конструкція збирається за допомогою великої кількості кріпильних матеріалів, необхідно постійно перевіряти каркас на предмет герметичності та цілісності; неможлива зміна геометричних розмірів теплиці; необхідний надійний фундамент; через меншу відбивну поверхню, всередину теплиці потрапляє надмірна кількість сонячного світла. Найкраще підходить для високорослих рослин, але догляд за рослинами, що ростуть біля стін, значно ускладнений. Також важливо правильно підбирати вид полікарбонату для огорожувальної конструкції та матеріали для зведення каркаса, так як від їх міцності буде залежати термін експлуатації споруди. Вони прості в збірці, доступні за ціною, вимагають мінімальної кількості часу на установку [10].

3. Краплеподібні - краплинні споруди з оригінальною формою (рис.1.13). За рахунок загостреному даху, сніг не залежується на теплиці, що підвищує надійність її конструкції до максимуму. З цієї ж причини відбувається більш ефективно прогрівання ґрунту на весні. Краплеподібні споруди –найкраще рішення для країн, де переважає холодний клімат з великою кількістю опадів.

Конструкція даху може витримувати до 70 кг снігу на 1 м². Єдиним недоліком краплеподібної конструкції є складність монтажу [10,11].

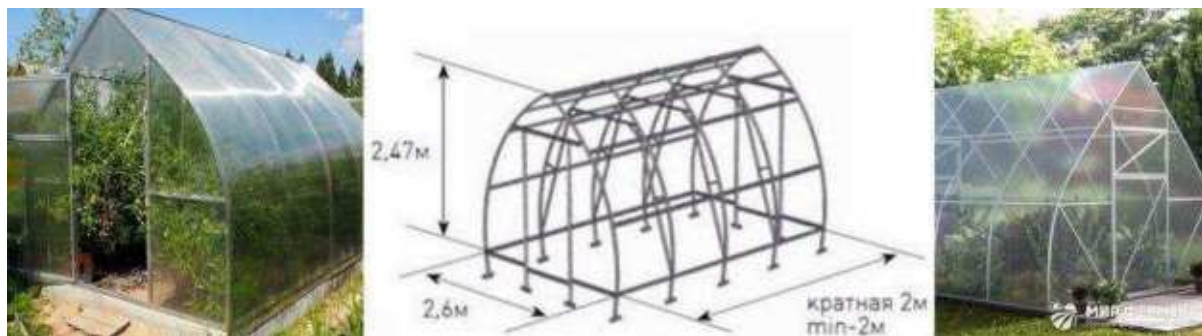


Рис.1.13. Зовнішній вигляд каплевидной споруди

4. Багатокутні – використовуються досить рідко (рис.1.14). Ці конструкції практичні, оскільки кожна з граней висвітлюється сонцем в різний час дня, проте підтримувати всередині неї стабільну температуру досить проблематично.



Рис.1.14. Особливості багатокутних теплиць

Крім того, вони належать до найбільш дорогих, оскільки споруджуються з дерева (металу) в поєднанні зі склом (полікарбонатом).

Полікарбонат ідеально підходить для покриття багатокутних конструкцій теплиць, оскільки йому можна надати будь-яку потрібну форму. Багатокутні споруди з полікарбонату стійкі, їх корисна площа набагато більше, ніж звичайних, а покриття захищає рослини від перегріву в жарку пору року.

5. Голландська теплиця – цей тип теплиць дає можливість рослинам отримувати максимальну кількість сонячного світла, адже її покриттям служить спеціальне скло однорідної структури (рис.1.15).



Рис.1.15. Зовнішні особливості голландської теплиці

Одинарне скління доповнюється вертикальною системою зашторювання. Система зашторювання – це спеціальний екран з пусковим механізмом. Екрани розташовані по всьому периметру теплиці. Вони дозволяють регулювати рівень проникнення сонячного світла всередину об'єкта. Опалення в теплиці зроблено таким чином, що температура на різних ділянках приміщення відрізняється зовсім незначно. Будівлю можна підключати до стаціонарних джерел обігріву. Система поливу повністю автоматизована, що дозволяє підтримувати постійний мікроклімат всередині [10, 8].

Головний принцип надійності і довговічності голландської теплиці – точний розрахунок сталевих конструкцій. Система алюмінієвих конструкцій визнана найсучаснішою в світі, так як заснована на багаторічному досвіді використання, дані типи теплиць постачаються на сотні гектарів на рік тільки в Нідерландах.

Матеріал огорожувальної конструкції та системи зашторювання підбираються спеціально для вирощування культур, а також в залежності від місцевого клімату. Відмінною особливістю сучасної голландської технології опалення є точний розрахунок необхідної кількості та місця розташування труб опалення, а також пристосування до вже наявних джерел тепла (зовнішня котельня чи підземне джерело тепла) з використанням теплообмінника [10, 8].

1.3.Порівняльний аналіз об'єктів тепличного господарства

Проведено аналіз різних видів теплиць за їх конструкцією, застосуванням та інженерними системами. Результати подано до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. ПОРІВНЯЛЬНА ТАБЛИЦЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ТЕПЛИЦІ

Параметри порівняння	Односклilі	Подвійні	Багатокутні	Голландські
Конструкція теплиці	Компактна	Надійна	Практична	Стійка, герметична
Монтаж	Складна	Складна	Проста	Складна
Застосування для площ експлуат.	Тільки для малих	Тільки для малих	Для середніх	Для великих
Система вентиляції	Механічна	Механічна	Механічна	Автоматична
Система зашторювання	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Автоматична
Система опалення	Відсутня	Відсутня	Механічна	Автоматична
Система рециркуляції	Механічна	Механічна	Механічна	Механічна
Сист. водопостачання та каналізації	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Автоматична
Система поливу	Відсутня	Відсутня	Механічна	Автоматична
Система резервного поливу	Відсутня	Відсутня	Механічна	Автоматична
Сист. Охолод. і зволож. повітря	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Автоматична
Система внутрішніх водостоків	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Автоматична
Система технологічного дренажу	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Автоматична
Автоматизована система	Відсутня	Відсутня	Механічна	Автоматична

управління мікрокліматом				
Системи електрообладнання	Механічна	Механічна	Механічна	Автоматична
Система підживлення рослин вуглекислим газом	Відсутня	Відсутня	Механічна	Автоматична
Система технологічного вирощування	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Відсутня
Технічні характеристики	Довжина: від 4.1 м Ширина: від 2.5 м Висота: від 2.5 м Покриття: полікарбонат Каркас: алюміній або оцинкована сталь	Довжина: від 4 м. Ширина: від 2 м Висота: 2 м Покриття: полікарбонат Каркас: алюміній, оцинкована сталь	Довжина: від 4.1 м Ширина: від 3 м Висота: від 2.5 м Покриття: полікарбонат Каркас: алюміній або оцинкована сталь	Довжина: від 4.1 м Ширина: від 5 м Висота: від 3 м Покриття: полікарбонат Каркас: алюміній, оцинкована сталь
Вартість за м ² , грн	1400	1325	1800	2100

Враховуючи вищеперераховані інженерні мережі, необхідні функціональні можливості та конструкції теплиць зроблено наступні висновки [6, 7]:

- Більшість конструкцій теплиць є досить простими, компактними та використовуються на малих площах;
- Монтаж даних споруд залежить від геометричних розмірів та типу конструкції. Тому чим більша конструкція, тим важчий монтаж;
- У більшості конструкцій або відсутня кліматична система або виконана механічно;
- Водопостачання у більшості випадків реалізовано механічно;

- Опалення або відсутнє взагалі або не забезпечує мікроклімат у теплиці;
- Штучне освітлення у теплицях використовується не раціонально і є досить затратним;
- Жодна система повністю не автоматизована;
- Теплиці з автоматизованими системи є досить коштовними. Їх окупність сягає більше 2 років.

1.4. Основні функції системи управління мікрокліматом

Автоматизована система управління мікрокліматом. Система керування використовується для контролю параметрів та управління мікрокліматом тепличного об'єкта [100]. Керування мікрокліматом теплиці реалізується за рахунок впливу на виконавчі інженерних систем теплиці [7,9,17,98]:

- системи обігріву повітря;
- системи підлоткового обігріву;
- системи вентиляції;
- системи зашторювання;
- системи випарного охолодження і зволоження;
- системи рециркуляції повітря;
- системи крапельного поливу

До складу автоматизованої системи управління мікрокліматом промислової теплиці входить:

- центральної станції керування;
- мікропроцесорних контролерів;
- метеостанції з датчиками;
- аналогових вимірювальних каналів;
- дискретних каналів контролю;
- каналів управління.

Застосування автоматизованої системи управління дозволяє: підвищити врожайність за рахунок гнучкого автоматичного підтримання заданих кліматичних значень; знизити споживання електроенергії; підвищити рівень

надійності та ефективності роботи обладнання; отримати достовірну та своєчасну технологічну агротехнічну інформації; визначити і видати сигнал передаварійної ситуації [9,20,90].

Контроль над параметрами мікроклімату в теплиці дозволяє відслідковувати постійні зміни внутрішніх і зовнішніх кліматичних показників (температури, швидкості і напрямку вітру, вологості повітря, рівня сонячної радіації).

На підставі параметрів, якими має керувати система мікроклімату встановлено, що необхідно керувати такими інженерними системами [9,20]:

- вентиляції;
- зашторювання;
- опалення;
- крапельного поливу;
- дозування вуглекислого газу.

1.5. Особливості автоматизованих систем управління мікрокліматом

Адаптивна система мікрокліматом промислової теплиці складається з [7,20]:

- центральної станції керування;
- мікропроцесорних контролерів;
- метеостанції з датчиками;
- аналогових вимірювальних каналів;
- дискретних каналів контролю;
- каналів управління.

Управління системою кліматичного контролю теплиць(рис.1.16): фрагмент системи опалення промислової теплиці. Для отримання оптимальних результатів вирощування потрібно відповідне управління.

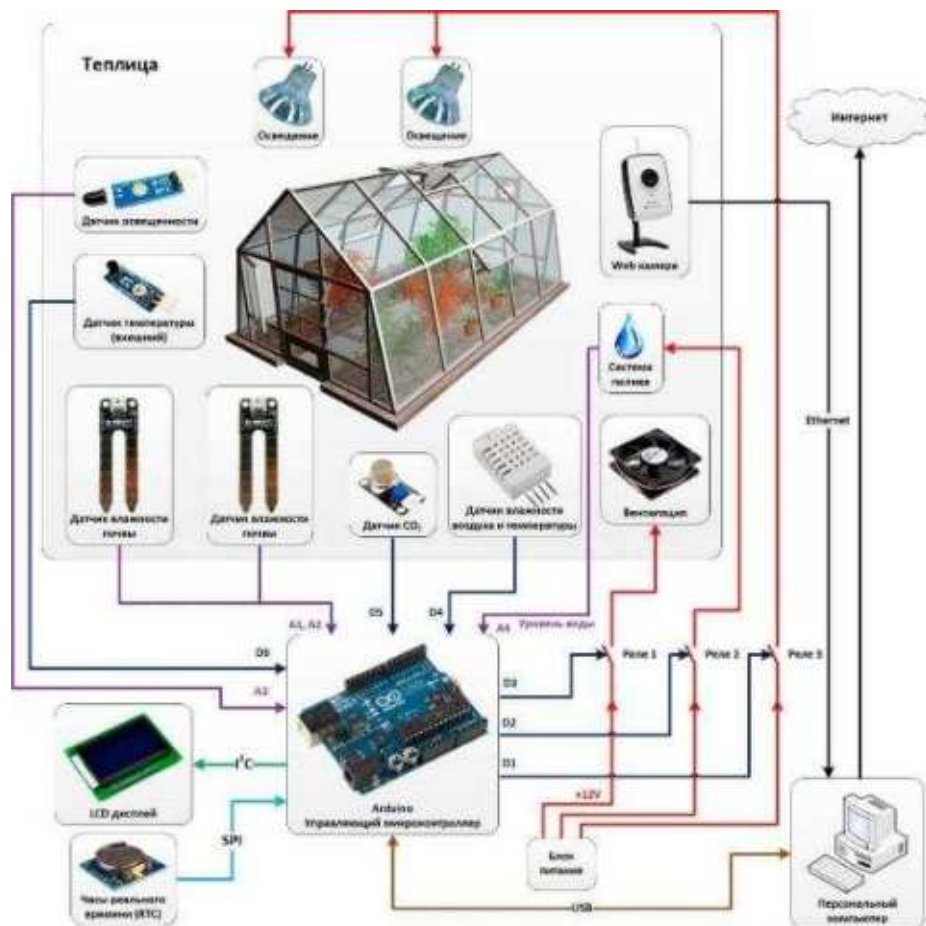


Рис.1.16. Система кліматичного контролю теплиці

Автоматизований контроль над мікрокліматом в теплицях дозволяє вести постійний аналіз внутрішніх і зовнішніх кліматичних показників (температури, швидкості і напрямку вітру, вологості, рівня сонячної радіації).

Кліматичні показники змінюються в часі. Внутрішня температура та відносна вологість теплиці - один із ключових параметрів, який безпосередньо впливає на виробництво рослинництва. Однак внутрішні кліматичні умови теплиці можуть швидко змінюватися через непередбачувані та нестабільні зовнішні кліматичні параметри. З цієї причини деякі дослідники запропонували використовувати інноваційні методики, засновані на штучному інтелекті, такі як нечітка логіка та нейронні мережі, які дозволяють досягти ефективного регулювання клімату всередині теплиці [20,85].

Для прогнозування мікроклімату теплиці, зазвичай, використовують штучну нейронну мережу (рис.1.19). Цей підхід здатний визначити нелінійну

залежність між мікрокліматичними даними (температурою, вологістю, швидкістю вітру та сонячним випромінюванням), що надходять у систему під час тренувальної фази, і на цій основі зробити прогноз, яка температура та вологість буде в майбутньому [7].

Спираючись на теорію Космогорова, нейронна мережа ВР з одним прихованим шаром, що включає достатню кількість нейронів, може наблизити будь-яку функцію з бажаною точністю [7,21].

Прогнозування мікроклімату теплиці з використанням комбінованої

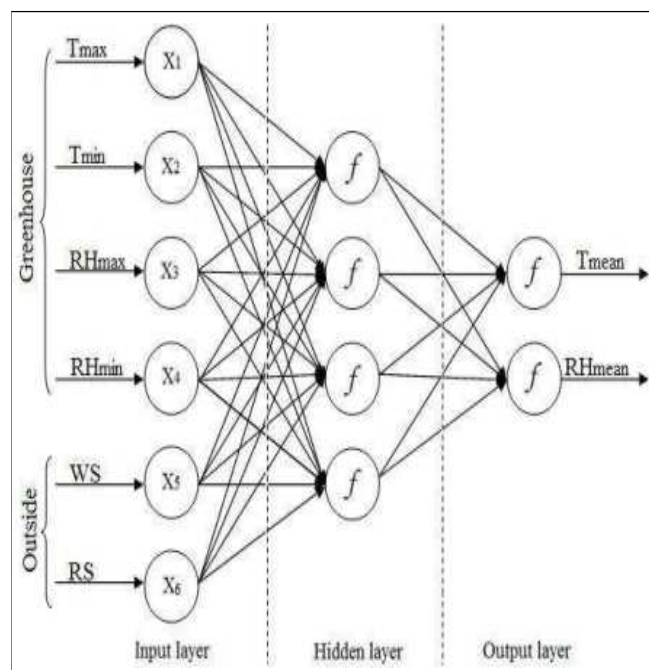


Рис.1.19. Модель штучної нейронної мережі

нейро-нечіткої моделі для динамічного та автоматичного контролю кліматичних параметрів теплиці проводиться за моделлю NNARX, яка досягла хороших прогнозних показників. Результати показують низьку похибку, пов'язану з апроксимацією даних. Більше того, результати запропонованого підходу дозволяють досягти гарного компромісу між швидкістю обертання охолоджувача та його температурою, щоб підвищити продуктивність врожаю. Принцип роботи запропонованої системи показаний на рисунку 1.20. Вона заснована на схемі нечіткої схеми паралельного управління (PCFS) [22].

Перевага цієї моделі полягає в тому, що нечітка логіка характеризується лінгвістичними правилами, а не складними математичними формулюваннями.

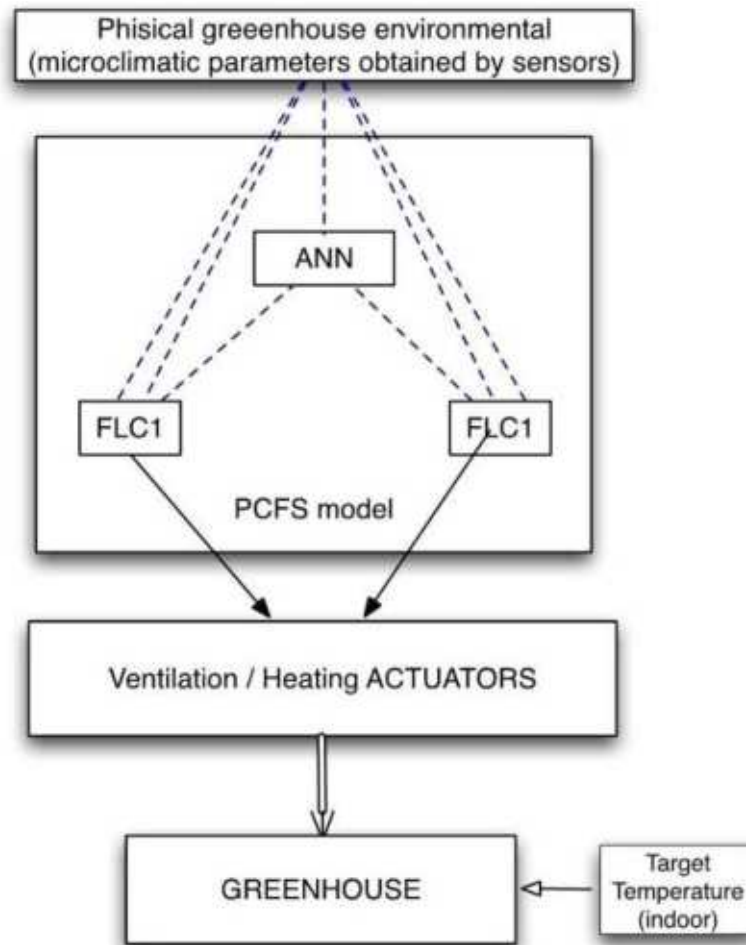


Рис.1.20. Модель системи PFCS. ANN: штучна нейронна мережа; та FLC: контролер нечіткої логіки.

Модель нейронної мережі MLP використовують для прогнозування тепличного мікроклімату, а її структура складається з трьох різних шарів: вхідного, прихованого та вихідного. Алгоритм зворотного поширення Левенберга–Марквардта було обрано методом проб і помилок, включаючи два різні алгоритми, зворотне поширення регуляризації та зворотне поширення квазіньютонів BFGS. Модель була реалізована для різної кількості вузлів у прихованому шарі (від 1 до 20), при цьому найкращі результати за період тестування були отримані для структури. Максимальна похибка дорівнювала 0,877 K і 2.838% для температури та відносної вологості, відповідно, а MAE, RMSE та R2 були розраховані рівними 0,218 K, 0,271 K та 0,999 для температури

та 0,339%, 0,481% та 0,999 для відносної вологості. Наведені вище значення як для максимальної похибки, так і для решти статистичних даних доводять, що конкретна модель може задовільно відповідати вимогам системи підтримки прийняття рішень [21].

Завдяки результатам, алгоритм зворотного поширення Левенберга–Марквардта був використаний як алгоритм навчання, алгоритм, заснований на методі Ньютона. Діаграма згенерованої моделі показана на рисунку 1.21 [22].

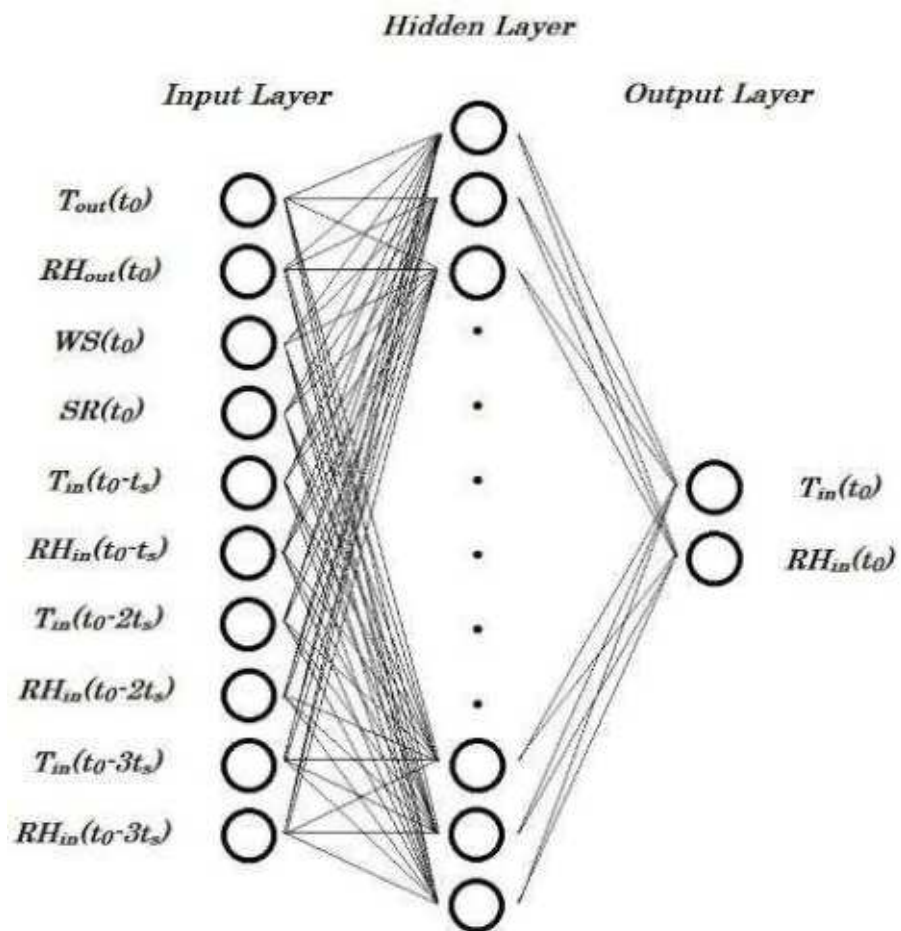


Рис.1.21. Схема структури нейронної мережі.

Відомі підходи для побудови систем керування тепличними об'єктами з застосуванням математичних та комп'ютерних моделей розглянуто в роботах [28,29]. У [24, 26] наведено приклади та проблеми побудови систем керування мікрокліматом теплиць за рахунок штучної нейронної мережі. Відслідковування розподілу температур за допомогою стаціонарних пристроїв розглядається у роботі [25]. Дослідження вказують на нестабільність процесів в об'єкті

регулювання і необхідність врахування багатьох взаємних впливів між цими процесами.

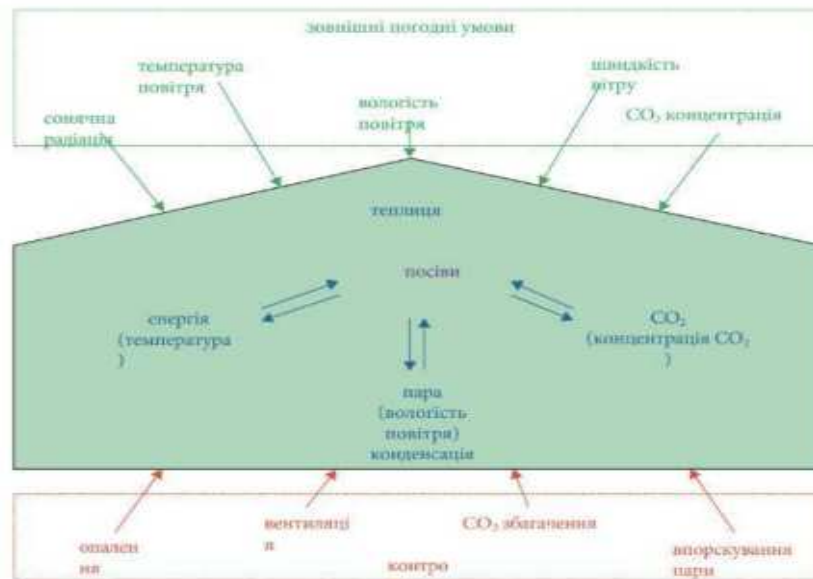
Нейронна мережа MLP використовувалася для прогнозування температури та відносної вологості всередині теплиці. Щоб знайти найкращу архітектуру, а точніше кількість вузлів у прихованому шарі, модель тестувалася протягом відповідних періодів.

При аналізі літературних даних було виявлено, що більшість досліджень зосереджені на застосуванні технології, спрямованих на створення мікроклімату в одній теплиці з певним тестовим середовищем [24]. В іншому прикладі використовують різну структуру та управління тепличного об'єкту [25]. Кіттас, К. та Барцанас, Т. виявили, що дані CFD моделювання вказують на різні розподіли швидкості повітря та вологості в тепличному об'єкті [26]. В дослідженні системи сонячного опалення та кліматизації теплиць [27] автори використовували лише дані про температуру та відносну вологість без врахування ситуації з відкриванням вікон провітрювання. У роботі Себастьян-Каміло Ванегас-Аяла, Хуліо Баронь-Веландія та Даніель-Девід Леаль-Лара розглянуто прогнозування вологості в тепличному об'єкті, визначено базову структуру середовища (рис. 1.22а). Дана схема враховує зовнішні погодні параметри та умови і механізми управління, які впливають на внутрішній клімат тепличного об'єкту. У роботі зазначено, що в моделі, яка розроблена для контролю та прогнозування вологості, використовуються система нечіткого виводу (рис. 1.22б). Ця модель базується на зовнішніх погодних умовах, таких як зовнішня температура, зовнішня вологість, глобальна радіація та швидкість вітру, та механізмах керування (вентиляція, опалення, затінення, штучне освітлення, CO₂ та туманоутворення), їх взаємодія визначається нечіткими правилами, а на виході нечіткої системи отримується значення внутрішньої вологості [30].

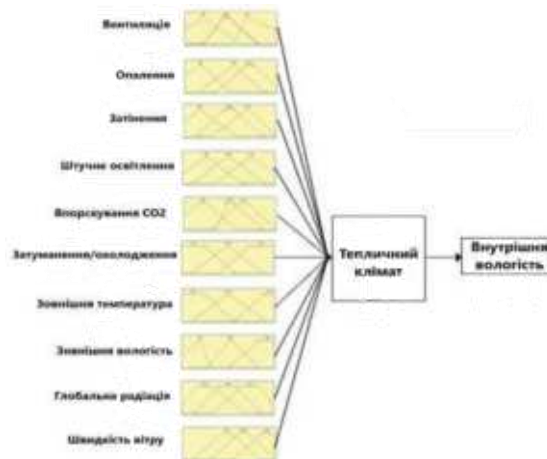
Проаналізовані дослідження вказують на нестабільність термодинамічних процесів та неможливість відслідковування змін втрати водяної пари у

тепличному об'єкті. В більшості наведених прикладів не враховано забезпечення балансу вологості повітря.

За результатами аналізу відомих технічних рішень [24,25,26,27] та результатів досліджень встановлено, що для забезпечення сталого режиму вологості повітря в середині тепличного об'єкту необхідно передбачити мехатронну систему керування вологістю.



а



б

Рис.1.22 а - Схема моделі парникового клімату; б - Блок-схема системи нечіткого виведення для прогнозування та контролю вологості в теплиці [30].

Таким чином в системі забезпечуватиметься вологості, що є невід'ємною частиною системи мікроклімату. Отже більшість конструкцій теплиць не розраховані на великі площі, досить дорогі та не мають власної кліматичної системи. Тому є актуальним питанням модернізації автоматизації інженерних систем теплиць для зменшення їх вартості та впровадження більш якісної системи контролю за показниками, що визначають продуктивність вирощування сільськогосподарської продукції. Також важливою задачею є прогнозування поведінки системи при зміні певних параметрів. Оскільки всі компоненти системи є залежними один від одного, зміна одного параметру буде впливати на роботу всієї системи в цілому.

Враховуючи вищесказане, пропонується провести комплексне дослідження спрямоване на створення адаптивних кліматичних систем тепличного господарства.

Застосування автоматизованої системи управління дозволяє: підвищити врожайність за рахунок гнучкого автоматичного підтримання заданих кліматичних значень; знизити споживання електроенергії; підвищити рівень надійності та ефективності роботи обладнання; отримати достовірну та своєчасну технологічну агротехнічну інформації; визначити і видати сигнал передаварійної ситуації. Тому актуальність теми дослідження полягає у збільшенні врожайності та термінів життєздатності приблизно на 15-20 % [27].

1.6. Мета та задачі роботи

Метою роботи є забезпечення регламентованих значень показників повітря в теплиці шляхом створення автоматизованої системи керування витратою і тиском повітряних потоків, вологістю, температурою та тепловими потоками з випереджуючим алгоритмом керуванням, що базується на використанні еталонної моделі тепло-масообмінних процесів в теплиці.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Теоретичне обґрунтування тепло-масообмінних процесів в теплиці.
2. Розробити загальну структуру об'єкту дослідження.
3. Розробити математичну та комп'ютерну модель теплиці.
4. Провести модельні дослідження розповсюдження і стабілізації параметрів по об'єму.
5. Розробити загальну структуру гідро-пневматичної системи мікроклімату та її розташування в теплиці.
6. Підібрати виконавчі пристрої, засоби контролю і керування.
7. Розробити програму для керування виконавчими пристроями.

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛИЧНОГО ОБ'ЄКТА СЕРЕДНЬОГО ОБ'ЄМУ

2.1. Загальні функції та структура мехатронної системи мікроклімату теплиці

Для підвищення енергоефективності теплиці шляхом створення автоматизованої мехатронної системи з упереджувачим алгоритмом багатofакторного адаптивного керування запропоновано узагальнену структуру керування теплиці з типовими підсистемами та їх функції (рис.2.1) [7,17,81]:

- Система вентиляції;
- Система зашторювання;
- Система обігріву;
- Система рециркуляції повітря;
- Система поливу;
- Система зволоження повітря;
- Система автоматизованого керування.



Рис.2.1. Узагальнена структура мехатронної системи

Враховуючи те, що в середині теплиці постійно відбуваються перехідні процеси зміни швидкості, тиску, вологості та температури; змін та втрати теплової потужності теплиці; зміна та втрата вологості повітря в теплиці було запропоновано структуру мехатронної системи з моделлю теплиці (рис.2.2).



Рис.2.2. Структура мехатронної системи з моделлю теплиці

Наступним кроком запропоновано встановити параметри, що надають вхідну і вихідну інформацію щодо функціонування і керування системою [7,17].

1. Всередині теплиці:
 - Температура повітря;
 - Відносна вологість повітря;
2. За межами теплиці:
 - Температура та відносна вологість повітря;
 - Швидкість та напрямок вітру.
3. Обладнання:

- Положення вентиляційних отворів;
- Подача водяної пари.

З огляду на перелік інженерних систем теплиці було визначено засоби керування та контролю (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Засоби керування та контролю мікроклімату теплиці

Інженерна система	Параметри, які контрол.	Виконавча частина	Засоби керування	Засоби контролю
Система вентиляції	Температура повітря	Вентиляційні отвори (приток повітря)	Гідропривід (пневмопривід)	Датчики температури та вологості, анемометр та флюгер. (На приток засоби контролю встановлюються на вулиці, а на витяжку – в теплиці)
		Вентилятор (витяжка повітря)	Робоче колесо	
	Вологість повітря	Вентиляційні отвори (приток повітря), насос	Гідропривід (пневмопривід), форсунки, клапан	
		Вентилятор (витяжка повітря)	Робоче колесо	
	Напрямок та швидкість вітру	Вентиляційні отвори	Гідропривід (пневмопривід)	
Система зашторювання	Рівень CO ₂	Шторний екран	Гідропривід (пневмопривід)	Оптичний датчик
Система опалення	Температура повітря та ґрунту	Змішувальні клапани, циркуляційні насоси, трубопроводи або нагрівачі	Клапани або нагрівальні елементи	Датчики температури
Система рециркуляції повітря	Температура повітря	Осьовий вентилятор	Робоче колесо	Датчики температури та вологості, анемометр та флюгер. (Встановлюються у середині теплиці)
	Вологість повітря	Осьовий вентилятор, насос	Робоче колесо, форсунки, клапан	
	Напрямок та швидкість руху повітряних мас	Осьовий вентилятор	Робоче колесо	
Система водопостачання та каналізації	Вологість ґрунту	Насос	Клапани	Водомірний вузол, датчик вологості
Система випарного охолодження та зволоження повітря	Вологість та температура повітря	ємність, насоси, механічний фільтр	Клапани, форсунки	Датчики температури та вологості

За результатами аналізу функцій системи мікроклімату було визначено вимоги до системи керування мікрокліматом тепличного об'єкту:

1. Температура є найважливішою змінною тепличного клімату, яку можна і потрібно контролювати. Більшість рослин, що вирощуються в теплицях, ростуть у теплий сезон і пристосовані до середніх температур в діапазоні 20-30 °C, з приблизною межею нижньої та верхньої температури 10 °C та 35 °C відповідно. Якщо середня мінімальна зовнішня температура нижче 10 °C, теплиця вимагає опалення, особливо вночі. Коли середня максимальна зовнішня температура менше 27 °C, вентиляція має запобігати надмірній внутрішній температурі протягом дня; однак, якщо середня максимальна температура перевищує 27-28 °C, система керування має увімкнути штучне охолодження. Максимальна температура теплиці, що перевищує 35 °C протягом тривалого періоду, шкідлива для більшості сільськогосподарських культур [31].

2. Для росту рослин підходить відносна вологість повітря в межах 60-90%. Значення нижче 60% можуть мати місце під час вентиляції в посушливих кліматичних зонах або коли рослини молоді з дрібними листками, і це може спричинити водний стрес. Серйозні проблеми можуть виникнути, якщо відносна вологість повітря перевищує 95 % протягом тривалих періодів, особливо вночі, оскільки це сприяє швидкому розвитку грибкових захворювань. Вдень вологість повітря зазвичай можна зменшити за допомогою вентиляції. Однак вночі, якщо теплиця не опалюється, внутрішні та зовнішні температури можуть бути подібними, і якщо зовнішня вологість висока, зменшити вологість теплиці не просто.

3. Збагачення CO₂ має важливе значення для підвищення якості продукції, адже постійне або періодичне збільшення CO₂ в теплиці може призвести до збільшення виробництва фруктів понад 20 відсотків. Концентрації CO₂ слід утримувати щонайменше до зовнішнього рівня. CO₂ поглинається через продихи в рослині, а отже, ефективне поглинання CO₂ у теплиці сильно залежить від інших кліматичних факторів, що впливають на отвори продихів у рослині[31].

4. Для раціонального використання води та добрив найкраще використовувати систему фертигації (крапельне зрошення), яка включає насоси, фільтри, панель управління, датчик ЕС та рН.
5. При понижених температурах зовнішнього повітряного середовища потрібно більше нагрівати температуру всередині теплиці, а в теплі – охолоджувати (за рахунок теплового обміну). Від відносної вологості навколишнього рідинного середовища залежить вологість повітря всередині теплиці. Якщо вологість низька - зволожувач повітря високого тиску, стиснене повітря використовується для розколювання води на крихітні крапельки, а потім рухається через теплицю повітряним потоком (спринклерна система). Коли вологість висока і низька температура можна спостерігати утворення конденсату. Конденсація може бути головною проблемою у певний час року, якої неможливо уникнути повністю. Анти крапля покривні матеріали використовуються для осушення теплиць. Плівки “проти крапель” містять спеціальні добавки, які усувають крапельки і утворюють натомість суцільний тонкий шар води, що стікає по боках.
6. Глобальна сонячна радіація, що надходить у теплицю, складається з трьох видів випромінювання, а саме ультрафіолетового випромінювання (УФ), активного фотосинтезуючого випромінювання (PAR) та ближнього інфрачервоного випромінювання (NIR). Більша частина УФ-випромінювання поглинається атмосферою Землі. Екстремальний вплив рослин на УФ може призвести до погіршення процесу фотосинтезу. PAR поглинається рослиною і є важливим для фотосинтезу та росту рослин. NIR менше поглинається рослиною, а більше структурою та обладнанням теплиць, викликаючи підвищення температури навколишнього середовища в теплиці. Охолодження теплиці здійснюється шляхом модифікації покривних матеріалів. NIR-фільтрація також проводиться за допомогою спеціальних пластикових целофанів, рухомих екранів або NIR-фільтрувальної фарби для затінення [31].
7. Від швидкості та напрямку вітру залежить яку фрамугу і на скільки відкривати в теплиці. А це у свою чергу впливає на вентиляцію теплиці.

8. Від кількості опадів залежить відносна вологість повітря, а відповідно мікроклімат теплиці.
9. Вентиляція теплиць найважливіша для контролю температури, відносної вологості та рівня CO₂. Хорошої вентиляції в теплиці можна досягти за допомогою комбінації вентиляційного отвору, вхідних дверей та вентиляторів.
10. Система затінення встановлюється здебільшого для запобігання передачі тепла від надмірного світла (блокування прямих сонячних променів). Тіньові штори також допомагають зменшити теплові втрати вночі. Якщо метеостанція виявляє високу сонячну радіацію, PLC активує електродвигуни (система згортання), а штори рухаються горизонтально.

Отже для адаптивної системи мікроклімату тепличного об'єкту прийнято:

- Підтримувати рівень температури повітря у діапазоні 20-30 °C.
- Підтримувати рівень відносної вологості повітря в межах 60-90%.
- Забезпечувати достатню кількість CO₂ для вирощування відповідних культур.
- Система поливу має бути раціональною та ефективною.
- Відслідковувати кліматичні зміни у навколишньому повітряному та рідинному середовищі, які впливають на працездатність системи мікроклімату теплиці.
- Встановити систему затінення для зменшення впливу сонячної радіації на рослини.
- Забезпечити рециркуляцію повітряних мас у тепличному об'єкті.

Враховуючи всі вимоги до системи керування теплицею було визначено основні параметри та структура тепличного об'єкту: температура та вологість повітря, система вентиляції з вікнами провітрювання, система затінення, система поливу та обігріву теплиці, система туманоутворення. Вказані складові є основою для структури мехатронної системи (рис.2.3).

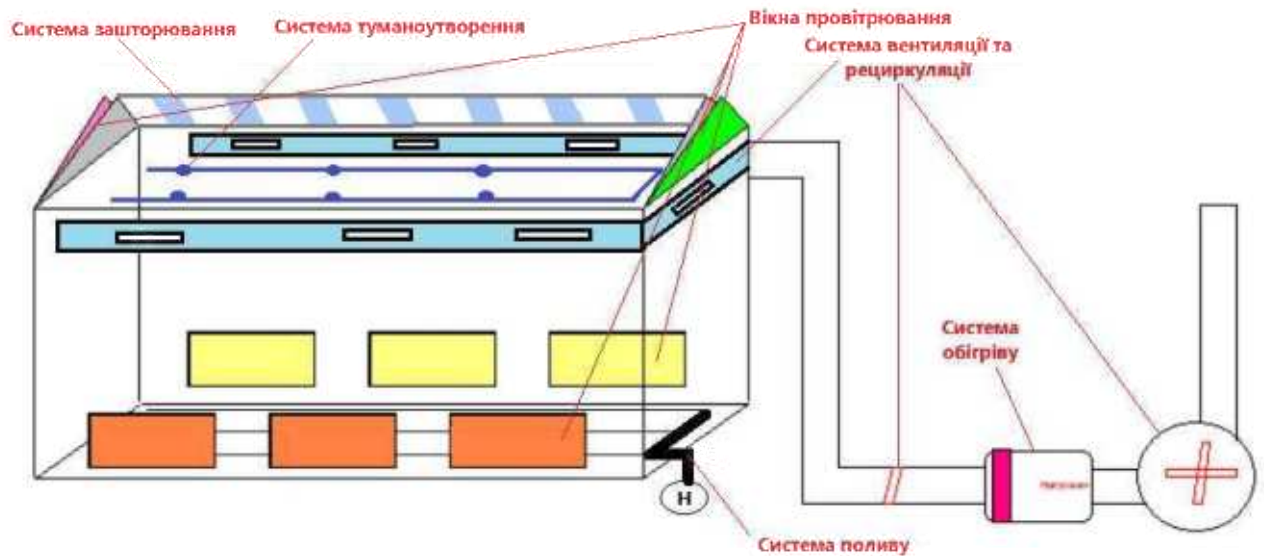


Рис.2.3. Структура мехатронної системи з моделлю теплиці та виконавчими елементами

2.2. Підсистема пневмо-гідралічної мехатронної системи мікроклімату – система вентиляції та рециркуляції

На етапі розробки системи керування було окремо розглянуто кожен підсистему мехатронної системи та визначено її особливості та засоби керування.

З огляду на загальну структуру запропоновано об'єднати в одну підсистему систему обігріву та системи вентиляції, систему керування вікнами провітрювання, підсистему рециркуляції (вентилятор та регулюючу заслінку). В результаті побудовано принципову схему підсистеми вентиляції та рециркуляції (рис.2.4) [41,99].

Для підтримання сталого обміну повітряних мас запропоновано встановити вентилятор, який через систему повітропроводів подає повітряний потік в середину тепличного об'єкту. Потік регулюється поворотними заслінками. Для рециркуляції повітря або витяжки запропоновано встановити витяжний вентилятор. У камері змішування змішується частина повітря з середини теплиці та частина зовні. Даний елемент дасть можливість зменшити втрати теплової потужності теплиці.

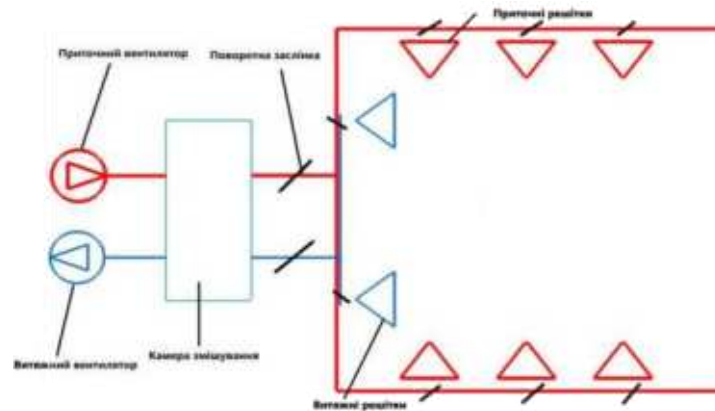


Рис.2.4. Загальна принципова схема системи вентиляції та рециркуляції

2.3. Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система провітрювання вікон та вентилятор

Наступним етапом було розглянуто пневматичну систему провітрювання, керування вікон та вентилятора.

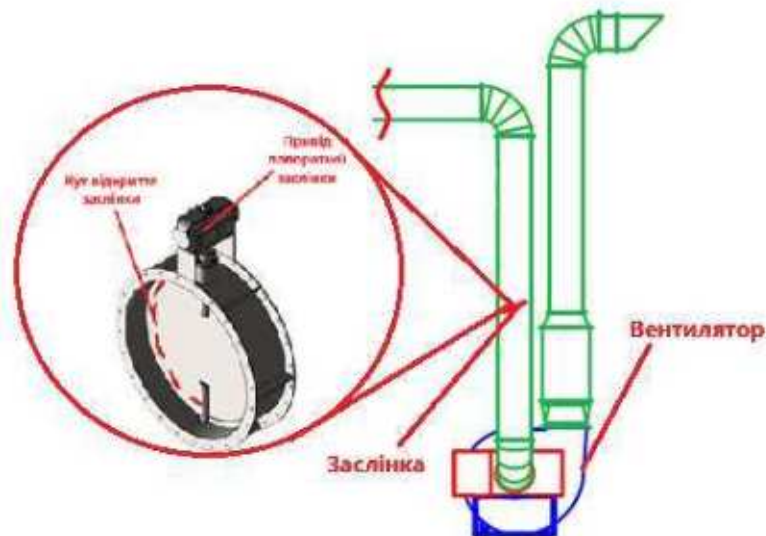


Рис.2.5. Фрагмент системи повітропроводу

З огляду на об'єм теплиці, вимоги до провітрювання та обмеження щодо швидкості повітряних потоків було розраховано і підібрано геометричні параметри повітропроводів і вентилятор з регулюючою заслінкою (рис.2.5). Для розрахунку прийнято теплицю з габаритними розмірами: довжина – 7 м, ширина – 4 м, висота – 1,6 м. Розміри вікон провітрювання – 600x150 мм, довжина

повітропроводу складає 10 м. На основі рекомендацій прийнято, що кратність повітрообміну в тепличному об'єкті у холодну пору року складає 5-10, в теплу – 30-50. Для розрахунку теплиці прийнято кратність 30. За вказаними параметрами було розраховано об'єм повітря, який потрібно подати в теплицю [34]:

$$Q = K * V * 3600 = 30 * 7 * 4 * 1,6 = 1344 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Згідно витраті та надлишковому тиску підібрано вентилятор ВЦ 10-28 (ВР 200-28) №4 з ел. двигуном AIP90L4 на 2,2 кВт 1500 об/хв з наступними характеристиками (рис.2. 6) [35].

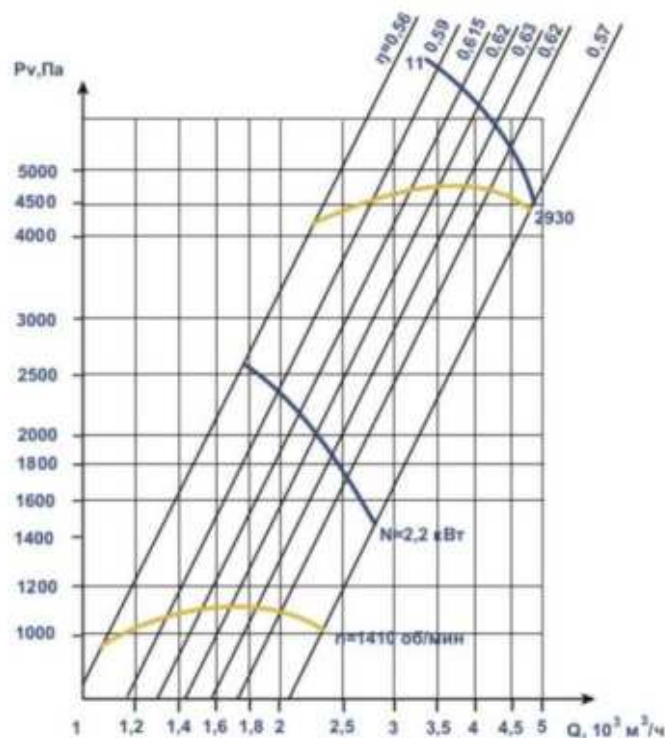


Рис.2.6. Аеродинамічні характеристики вентилятора ВЦ 10-28, Q - витрата повітря, тис.м³/год; P_v - повний тиск; η - коефіцієнт корисної дії (ККД); N - споживана потужність двигуна, кВт; U - окружна швидкість колеса, м/с; n - кількість обертів на робочому колесі, об/хв.

Це дозволило розрахувати аеродинамічний супротив регулюючої заслінки та визначити керуюче зусилля і силову характеристику виконавчого пневмоприводу пневмо-гідравлічної мехатронна система (додаток Б).

За вихідними даними (табл. 2.2) виконано розрахунок регулюючої характеристики дросельної заслінки [35].

Таблиця 2.2. Вихідні дані повітропроводу для розрахунку заслінки

Робоча точка вентилятора: Продуктивність, м³/ч	1080-2340
Робоча точка вентилятора: Тиск, Па	971-1096
Довжина повітропроводу, м	10
Діаметр повітропроводу, м	0,2
Додаткові опори ζ	4
Густина повітря ρ , кг/м³	1,177
Коефіцієнт динамічної в'язкості, мкПа	18,6

Згідно параметрів повітропроводу було визначено втрата тиску на тертя [Па] [36]:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2} * \rho, \quad (2-1)$$

де:

λ - коефіцієнт тертя;

L – довжина повітропроводу, м;

d – діаметр повітропроводу, м;

v – швидкість потоку повітря, м/с;

ρ – густина повітря, кг/м³.

Значення густини повітря приймаємо 1,185 кг/м³. Значення коефіцієнту динамічної в'язкості повітря приймаємо 18,6 мкПа с. Враховуючи вище вказані дані, коефіцієнт кінематичної в'язкості отримуємо за формулою $[10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}]$ [36]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{18,6 * 10^{-6}}{1,185} = 15,69 * 10^{-6}$$

Стала середня швидкість руху повітря визначена за визначеною кратністю повітрообміну [м/с]:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 * 440}{3.14 * 0.2^2 * 3600} = 3,894$$

Для визначення режиму руху застосовується формула Рейнольдса [36]:

$$Re = \frac{v * d}{\nu} = \frac{3,894 * 0,2}{15,69 * 10^{-6}} = 49636$$

Число Рейнольдса більше за значення 2320, то такий режим потоку є турбулентним. Для першої ділянки число Рейнольдса обраховується за формулою Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} = \frac{0,316}{49636^{0,25}} = 14,92$$

На перехідній ділянці коефіцієнт тертя буде залежить від шорсткості повітропроводу та числа Рейнольдса. Для даної області коефіцієнт тертя буде визначатися за формулою Кольбрука-Уайта [37,38]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{[-2\lg(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k_{\text{екв}}}{3,7d_{\text{в}}})]^2} = \frac{1}{[-2\lg(\frac{2,51}{49636\sqrt{14,92}} + \frac{0,15}{3,7 * 0,2})]^2} \\ &= \frac{1}{[-2\lg 0,203]^2} = \frac{1}{1,92} = 0,52 \end{aligned}$$

Для третьої ділянки коефіцієнт тертя визначається за формулою Прандтля-Нікурадзе [37,38]:

$$\lambda = \frac{1}{(1,14 + 2\lg \frac{d_{\text{в}}}{k_{\text{екв}}})^2} = \frac{1}{(1,14 + 2\lg \frac{0,2}{0,15})^2} = \frac{1}{(1,388)^2} = \frac{1}{1,926} = 0,52$$

Число Рейнольдса відповідно до третьої ділянки визначають за формулою:

$$Re_{\text{кр}} = 560 \frac{d_{\text{в}}}{k_{\text{екв}}} = 560 \frac{0,2}{0,15} = 746,66$$

Визначаємо втрати тиску по довжині повітропроводу, Па:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2} * \rho = 0,52 \frac{10}{0,2} * \frac{3,894^2}{2} * 1,185 = 233,58$$

Визначаємо місцеві втрати тиску, Па:

$$\Delta p = \xi \frac{v^2}{2} * \rho = 4 * \frac{3,894^2}{2} * 1,185 = 35,93$$

За результатами розрахунків визначено загальні втрати тиску, Па:

$$\Delta p = p_b - p_m - p_l = 281 - 233,58 - 35,93 = 269,51$$

В залежності від витрати повітря через заслінку на ній буде наступний перепад тиску, Па [37,38]:

$$\Delta p = \frac{8\zeta(\alpha)\rho Q^2}{\pi^2 d^4} \quad (2-2)$$

Зробивши математичні спрощення отримаємо, що залежність коефіцієнту опору заслінки від витрати матиме наступний вигляд:

$$\zeta(\alpha) = \frac{\Delta p \pi^2 d^4}{8\rho Q^2} = \frac{269,51 \cdot 3,14^2 \cdot 0,2^4}{8 \cdot 1,185 \cdot 4 \cdot 440^2} = 0,00000058.$$

Провівши аналогічні розрахунки для діапазону відкриття заслінки від 5° до 80° отримано залежність крутного моменту від кута відкриття заслінки, перепаду тиску та витрати потоку повітря (табл.2.3).

Таблиця 2.3. Розрахунок діапазону відкриття заслінки від 5° до 80°

№	Q	α	χ	Δp	$M_{кр}^B$	N_n	$\zeta(\alpha)$	$v(\alpha)$	$M_{кр}^3$
1	1622	80	90	30,09	0,098	1,37	0,99	14,34	0,032
2	1612	75	74,6	63,16	0,4	5,61	2,11	14,26	0,13
3	1595	70	61	118,9	1,12	15,55	4,05	14,11	0,37
4	1578	65	48	174,05	2,23	30,97	6,07	13,96	0,74
5	1560	60	34,4	231,8	3,66	50,95	8,27	13,8	1,22
6	1545	55	22,4	279,42	5,25	73,11	10,16	13,66	1,75
7	1530	50	17,4	326,58	7	97,42	12,11	13,53	2,33
8	1453	45	13	561,42	13,52	188,04	23,09	12,85	4,5
9	1440	40	9,8	599,88	15,79	219,75	25,12	12,73	5,26
10	1295	35	6	1005,35	28,75	399,86	52,06	11,45	9,58
11	1280	30	4,8	1044,84	32,26	448,37	55,38	11,32	10,75
12	1000	25	3	1697,56	54,93	764,01	147,43	8,84	18,30
13	750	20	2	2144,88	72,63	1010,23	331,17	6,63	24,21
14	730	15	1,2	2175,14	76,85	1070,02	354,5	6,45	25,61
15	420	10	0,8	2539,64	91,59	1275,91	1250,4	3,71	30,53
16	395	5	0,6	2560,29	94,31	1313,18	1425,29	3,49	31,43

Результати розрахунку крутного моменту поворотної заслінки на відкриття та закриття дали можливість підібрати виконавчі пристрої для пневмо-гідравлічної мехатронної системи, а саме привід заслінки, розподільчий клапан, ресивер.

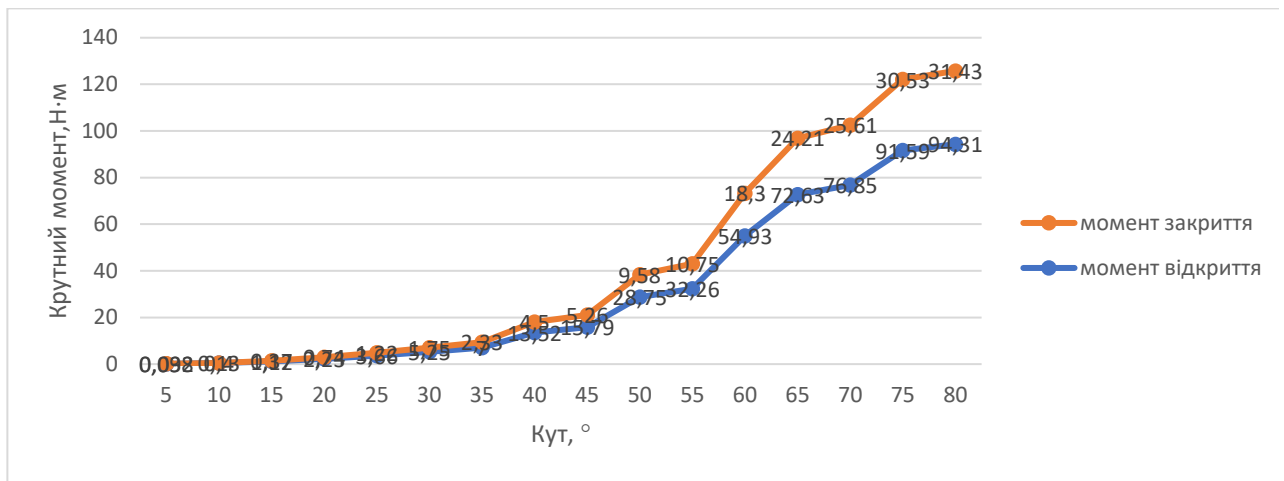


Рис.2.7. Залежність крутного моменту пневматичного приводу заслінки на відкриття та закриття від кута відкриття поворотної заслінки

Підібрано пневматичний циліндр CRHD-32 з шарнірним з'єднанням і розподільним клапаном VUVS-25-S. Пневматичний привід забезпечує зусилля 2360 Н при тиску 0,6МПа при закритті заслінки і 2770 Н при відкритті заслінки. З урахуванням максимальних розрахункових навантажень 1300 Н маємо запас по зусиллю 1,82 ... 2,13, що відповідає вимогам щодо експлуатації приводу в умовах відкритого простору з річними і добовими коливаннями температури і вологості [39].

2.4. Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система обігріву. Розрахунок теплової потужності нагрівачів. Схема виконавчих пристроїв підсистеми.

Підсистема обігріву. Для обігріву тепличного об'єкту середнього об'єму запропоновано використовувати електричний нагрівач. Розроблено принципову схему розміщення нагрівачів у приточній системі вентиляції (рис.2.8).

Для підбору нагрівачів треба визначити теплову потужність для заданого об'єму теплиці. При підготовці розрахунків витрати повітря для провітрювання теплиці було знайдено оптимальне значення витрати повітря та тиску, які проводилися попередньо. Відповідно до отриманих значень було підібрано вентилятор. Початкові дані для розрахунку наведені в таблиці 2.2 [37,38].

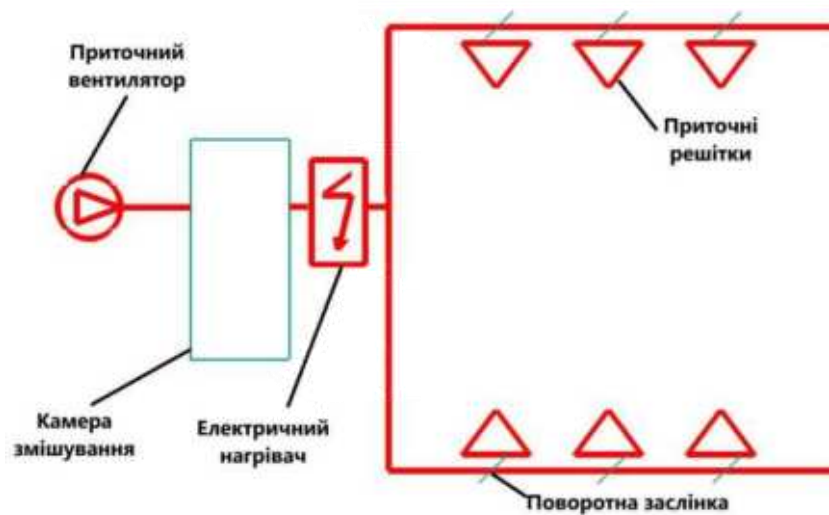


Рис.2.8. Принципова схема розміщення нагрівачів в системі повітропроводу

Початкова температура зовнішнього повітряного середовища складає 10 °С, а температура яку потрібно підтримувати в теплиці 18°С. Спочатку було визначено теплову потужність нагрівача:

$$Q_k = c * G(t_{np} - t_n), \text{ кВт},$$

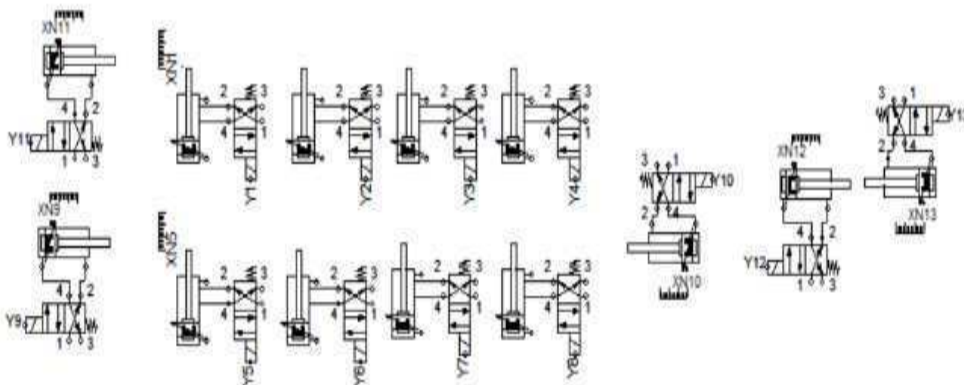
де:

c – теплоємність повітря, $c=1,005 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

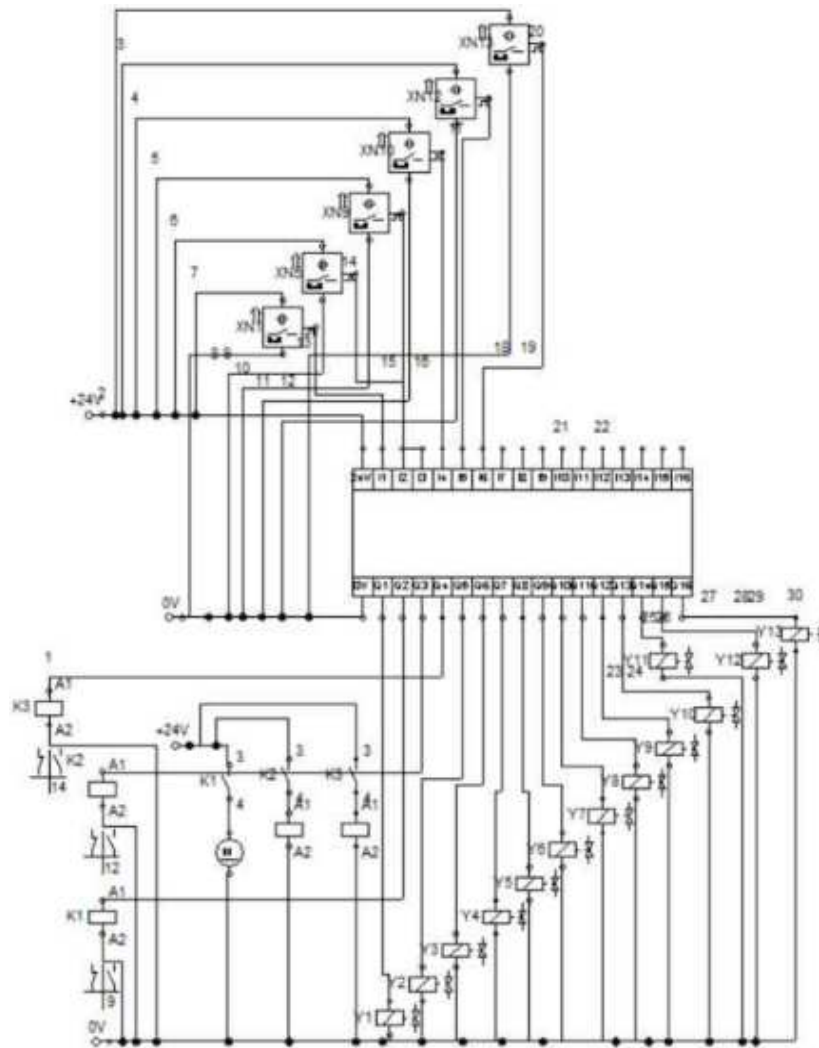
G- масова витрата повітря, кг/с;

t_{np}, t_n – температура повітря на вході та виході з нагрівача.

$$Q_k = 1,005 * 0,47 * (18 - 10)=3,78 \text{ кВт}$$



а



б

Рис. 2.9. Загальну схему виконавчих пристроїв: а – схеми виконавчих пристроїв(FluidSIM): б – схема підключення виконавчих пристроїв (Y1-Y8 – управління приводами нижніх вікон провітрювання; Y9, Y10 - управління приводами верхніх вікон провітрювання; Y11 – управління приводом зашторювання; Y12, Y13 – управління приводом заслінки; K2 – управління нагрівачем; K1 та K3 – управління вентиляторами).

Отже, для обігріву тепличного об'єкту, при необхідності підтримування сталої температури в розмірі 18°C, необхідно нагрівач з потужністю 4,0 кВт.

Для температури зовнішнього повітряного середовища 10 °C, а температура яку потрібно підтримувати в теплиці 20°C. Теплова потужність нагрівача буде складати:

$$Q_k = 1,005 * 0,47 * (20 - 10) = 4,7 \text{ кВт}$$

Отже, для обігріву тепличного об'єкту, при необхідності підтримування сталої температури в розмірі 20°C, необхідно нагрівач з потужністю 6,0 кВт. Запропоновано встановити нагрівач Вентс НК 400х200-6,0-3 [40].

Отримані розрахунки дали можливість розробити загальну схему виконавчих пристроїв для систем вентиляції, зашторювання, опалення та вікнами провітрювання (рис.2.9) [32,33].

2.5. Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система зволоження повітря в тепличному об'єкті. Розрахунок продуктивності та кількості форсунок

Підсистема забезпечення вологості. Для створення пневмо-гідравлічної мехатронної системи керування вологістю необхідно врахувати залежності змін витрати водяної пари для підтримки балансу вологості теплиці у часі під впливом прогнозованих змін параметрів оточуючого повітряного та рідинного середовища. Це дозволить визначити кількість водяної пари, яка має бути додана або вилучена, для компенсації у разі відхилення рівня вологості повітря в теплиці. Отримання вказаних залежностей може бути здійснено за допомогою моделювання функціонування теплиці на протязі доби.

Для забезпечення балансу вологості в тепличному об'єкті малого об'єму було враховано вологість повітря, яка знаходиться всередині теплиці та вологість повітря, яке подається в тепличний об'єкт. Для цього запропоновано рівняння балансу водяної пари в середині замкненого об'єму [32,33]:

$$Q_{\phi} * T1 * \Delta t1 = 30 * v * S * T2 * \phi * \Delta t2 = \phi T, \quad (2-3)$$

де:

Q_{ϕ} - продуктивність форсунок, л/год;

$T1$ - температура водяної пари, °C;

$\Delta t1$ – час роботи форсунок, год;

30 – кратність повітрообміну для тепличного об'єкту;

v – швидкість потоку припливного повітря;

S – площа поперечного перерізу припливного повітропроводу, м^2 ;

T_2 – температура припливного повітря, $^{\circ}\text{C}$;

ϕ – вологість припливного повітря, %;

Δt_2 – час роботи вентилятора, год;

ϕ_t – задане початкове стає значення вологості в середині тепличного об'єкту (для даного дослідження ϕ_t прийнято 70 %).

Запропоновано визначити кількості форсунок, що базується на співвідношенні площі зволоження теплиці і діаметрі розпилення форсунки [42]:

$$D = 2Htg\frac{\alpha}{2}, \quad (2-4)$$

де:

H – висота розпилення;

α – кут розпилення.

Відстань між форсунками, що забезпечує достатньо рівномірне зволоження, визначається з діаметра розпилення [5]:

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} D, \quad (2-5)$$

Провівши розрахунки для даного типу теплиці з урахуванням кута розпилення (наприклад, 68° з характеристик форсунки) визначено, що діаметр розпилення одної форсунки може складати 2,5 метри [13].

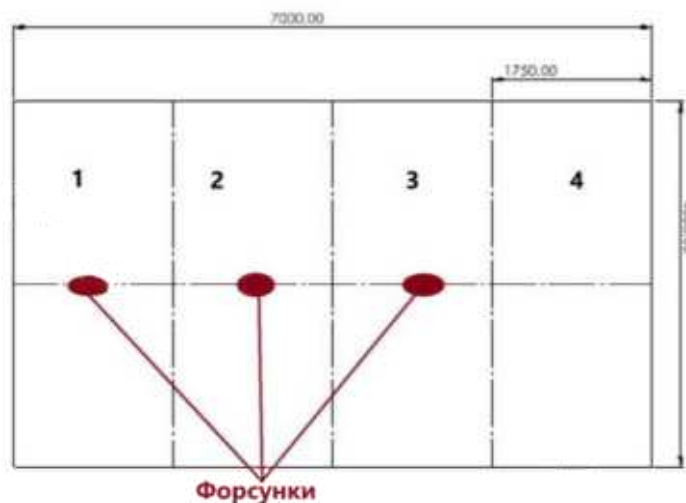


Рис.2.10. Принципова схема розміщення форсунок в тепличному об'єкті

Для наповнення мережі зволоження водою або зливу води, за необхідності, в системі застосовано клапан Р1. Для керування вмиканням і вимиканням форсунок встановлені клапани Р2, Р3 і Р4, які оздоблені зворотними клапанами для запобігання утворення повітряних пробок. Враховуючі різні відстані від насосного агрегату до форсунок в системі передбачено один або декілька

балансних дроселів, за допомогою яких буде вирівняно тиск на вході форсунок. Реле тиску РТ, контролює рівень робочого тиску рідини в системі та подає сигнал для вмикання насосного агрегату у випадку недостатнього рівня тиску [32,33].

Згідно розрахунку балансу вмісту вологи достатньо задіяти три форсунки з продуктивністю 2 л/год та тиском 3 бари, наприклад UM50M. Для визначення координат розміщення форсунок розділимо теплицю на чотири зони. До першої зони, найближчої до перерізу нагнітання повітря, відноситься форсунка F1. Приблизно 1/2 продуктивності F1 залишається в зоні 1, а решта продуктивності F1 розподіляється по інших зонах теплиці (Зона 1 = 1/2 F1). У другій зоні працює форсунка F2. Зона 2 отримує вологу від перших двох форсунок: $0,5F2 + 0,25F1$. Решта продуктивності F2 розподіляється по зонах 3 і 4. У третій зоні працює форсунка F3. Зона 3 отримує 0,5 від F3, 0,25 від F2 і 0,125 від F1. Решта продуктивності F3 розподіляється по залишковому об'єму теплиці. До четвертої зони надходить 0,5 від F3, 0,25 від F2 і залишок від F1. За гіпотетичною схемою розраховано таке розміщення форсунок в тепличному об'єкті, яке забезпечує рівномірне постачання вологи на одиницю довжини теплиці (рис.2.10).

2.6. Підсистема пневмо-гідравлічної мехатронної системи мікроклімату – система поливу в тепличному об'єкті. Гідравлічний розрахунок системи поливу

Підсистема забезпечення поливу. Моделювання роботи системи поливу було реалізовано в програмному забезпеченні «Fluidsim». На рисунку 2.12 показана принципова схема, при включенні насосної станції та розподільників P1, P2, P3, працює система краплинного поливу та система зволоження повітря.

Для принципової схеми поливу було проведено гідравлічні розрахунки. Для початку визначено максимальну щоденну потребу у воді з метою перевірки можливостей вододжерела, вибору фільтростанції та решти виконавчих пристроїв. На півдні України за максимальну щоденну зрошувальну норму приймають 60-70 м³/га [43].

Прийнято, що потреба у воді складає 7 літрів на м² за добу, тобто площини тепличного об'єкту, 28 м², максимальне значення витрати в день буде сягати:

$$Q = 196 \text{ л/д} = 0,216 \text{ л/хв.}$$

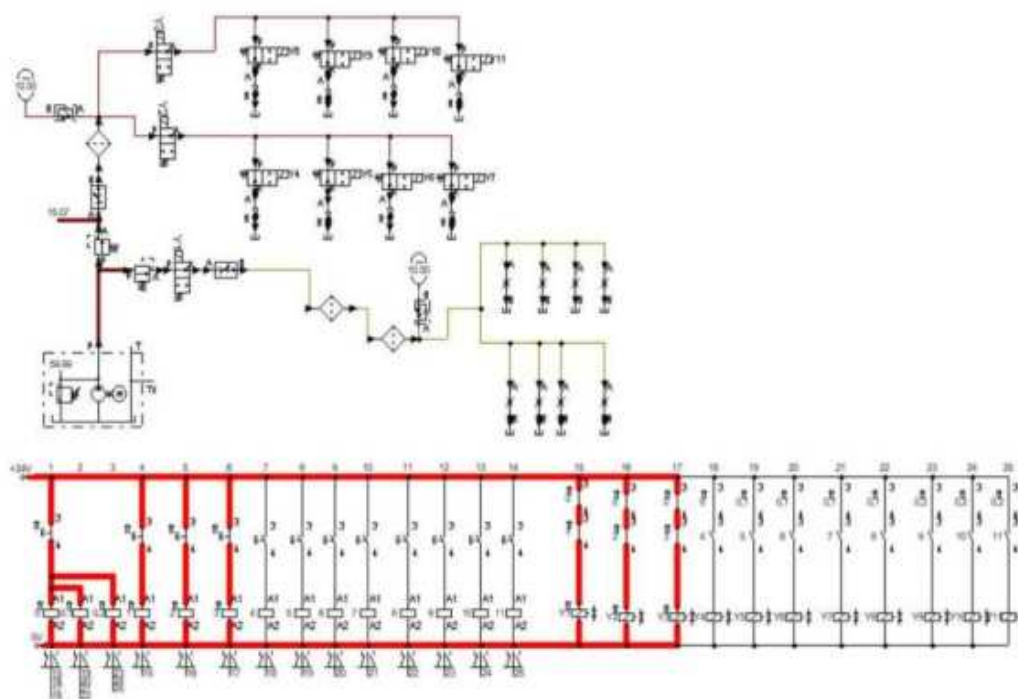


Рис.2.12. Принципова схема системи поливу [43]

Вибір розмірів трубопроводу (рис.2.13):

Для всмоктувального трубопроводу: $l_0 = 0,15 \text{ м}$;

Для напірного трубопроводу: $l_1 = 0,30 \text{ м}$; $l_2 = 0,35 \text{ м}$; $l_3 = 3,1 \text{ м}$; $l_4 = 0,20 \text{ м}$; $l_5 = 0,20 \text{ м}$;

$l_6 = 6,8 \text{ м}$; $l_7 = 6,8 \text{ м}$;

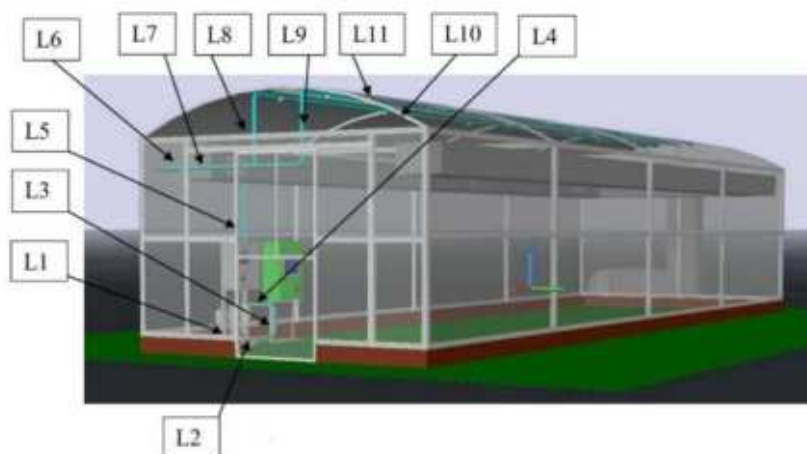


Рис.2.13. Схема розміщення трубопроводу в теплиці

Формула для розрахунку внутрішнього діаметру трубопроводу в теплиці [36]:

$$d_n = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max n}}{V_n}}, \quad (2-6)$$

де:

$Q_{\max n}$ – максимальна витрата на напірній лінії, м³/год;

V_n – середня швидкість потоку рідини на напірній лінії, м/с.

Середню швидкість рідини вибрано у залежності від призначення трубопроводу [43]:

для всмоктувальних $V=1,2$ м/с;

для зливних $V= 2$ м/с;

для напірних $V= 3...4$ м/с.

Внутрішній діаметр трубопроводів для всмоктувальної лінії визначається за формулою [36]:

$$d_n = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max n}}{V_n}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{0,0000036}{1,2}} = 0,0079 \text{ (м)}.$$

Згідно ДЕРЖСТАНДАРТУ 8732-78 приймаємо $d_n = 8$ мм.

Внутрішній діаметр трубопроводів для напірної лінії визначається за формулою:

$$d_n = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max n}}{V_n}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{0,0000036}{3,1}} = 0,0049 \text{ (м)}.$$

Згідно ДЕРЖСТАНДАРТУ 8732-78 приймаємо $d_n = 5$ мм.

За прийнятим діаметром визначено дійсну швидкість руху рідини в трубопроводі [36]:

На всмоктувальній лінії:

$$V_b = 4 \cdot Q / \pi \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 0,0000036}{3,14 \cdot 0,008^2} = 0,071 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

На напірній лінії:

$$V_H = 4 \cdot Q / \pi \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 0,0000036}{3,14 \cdot 0,005^2} = 0,183 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Визначення втрат по довжині трубопроводу. Втрати тиску на тертя [36]:

$$\Delta p_T = (0,5 \rho L \lambda V^2) / d_T, \quad (2-7)$$

де:

ρ - густина, кг/м³ ;

λ - коефіцієнт тертя;

L - довжина ділянки, м;

d_m - діаметр труби або шлангу, м;

V - середня швидкість рідини м/ с.

Коефіцієнт тертя λ залежить від режиму руху рідини й визначається по числу Рейнольдса [36]:

$$Re = Vd / \nu, \quad (2-8)$$

де:

V – швидкість потоку рідини, м/ с;

d – внутрішній діаметр трубопроводу, м;

ν - кінематична в'язкість рідини, м²/с.

При ламінарному русі рідини ($Re < 2320$). З огляду на можливості звуження й скривлення перетину труби при практичних розрахунках прийнято:

$$\lambda = 75 / Re. \quad (2-9)$$

При турбулентному русі ($Re \geq 2320$) коефіцієнт тертя λ залежить від числа Рейнольдса й від відносної шорсткості стінок каналу. Сталеві труби мають шорсткість $\Delta = 0,03\text{мм}$ [36].

- Враховано втрати на гідравлічне тертя на всмоктувальній лінії ($l=0,35\text{м}$)

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 0,35 \cdot 0,13 \cdot 0,071^2}{0,008} = 14 \text{ Па},$$

де число Рейнольда $Re = \frac{0,071 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 565 < 2320$ - ламінарний режим руху.

Коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору [36]:

$$\lambda = \frac{75}{565} = 0,13.$$

- Вирахуємо втрати на гідравлічне тертя на напірній лінії ($l = 17,75\text{м}$).

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 17,75 \cdot 0,08 \cdot 0,183^2}{0,005} = 4755 \text{ Па},$$

де коефіцієнт Рейнольда $Re = \frac{0,183 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 911 < 2320$ - ламінарний режим

Коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору:

$$\lambda = \frac{75}{911} = 0,08.$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.4

Таблиця 2.4. Втрати га гідравлічне тертя

Номер ділянки	L, M	$d, мм$	$Q, л/хв.$	$V, м/с$	Re	λ	$\Delta p_T, Па$
1	0,35	8	0,129	0,071	565	0,13	14
2	17,75	5	0,129	0,183	911	0,08	4475

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат, Па [36]:

$$\Delta p_T = 14 + 4475 = 4489.$$

Втрати на місцевих опорах. Втрати на місцевих опорах визначимо за формулою [36]:

$$\Delta p_M = 0,5 \rho \xi V^2, \quad (2-10)$$

де: ξ - коефіцієнт місцевого опору.

Місцевими втратами на лінії всмоктування є:

- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.

Отже маємо:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,0071^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,0071^2) = 1 \text{ Па}.$$

Місцевими втратами на лінії нагнітання є:

- Вхід у розподільник $\xi = 0,9$.
- Вихід з розподільника $\xi = 0,7$.

- Трійник $\xi = 2,5$ (4 штуки).
- Редукційний клапан $\xi = 2,2$.
- Регулятор витрати $\xi = 2$.
- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.
- Коліно закруглене $\xi = 0,15$ (4 штуки).
- Дросель $\xi = 2$ (8 штук).

Втрати на розподільнику [36]:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,183^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,183^2) = 27 \text{ Па.}$$

Втрати на трійниках:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2,5 \cdot 10) \cdot 0,183^2) = 418 \text{ Па.}$$

Втрати на редукційному клапані:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 2,2 \cdot 0,183^2) = 37 \text{ Па.}$$

Втрати на регуляторі витрати:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 0,183^2) = 33 \text{ Па.}$$

Втрати на фільтрі:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,183^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,183^2) = 27 \text{ Па.}$$

Так як в системі встановлено два фільтри сумарна втрата $\Delta p_M = 54 \text{ Па.}$

Втрати на коліно закруглене:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (0,15 \cdot 4) \cdot 0,183^2) = 10 \text{ Па.}$$

Втрати на дроселі:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2 \cdot 8) \cdot 0,183^2) = 268 \text{ Па.}$$

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_M = 1 + 27 + 418 + 37 + 33 + 54 + 10 + 268 = 848 \text{ Па.}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.5 [36]:

Таблиця 2.5. Втрати на місцевих опорах

Вид опору	Кількість	ξ	Δp_m , Па
Трійник	10	2,5	418
фільтр	3	1,6	55
Розподільник	1	1,6	27
Редукційний клапан	1	2,2	37
Регулятор витрати	1	2	33
Коліно закруглене	4	0,15	10
Дроселі	8	2	268

Розрахунок втрат на гідроапаратах. Для розрахунку втрат було підібрано більшу частину обладнання гідросистеми та взято значення втрат з каталогів [43].

- Втрати на розподільнику Hunter PGV-100G-B [44]:

З характеристики розподільника $\Delta p_d = 0,009$ МПа.

- Втрати на регуляторі витрати РПМ-102 [45]:

З характеристики регулятора витрати $\Delta p_d = 0,03$ МПа.

- Втрати на фільтрі Saleplas 1 [46]:

З характеристики фільтра $\Delta p_d = 0,001$ МПа, так як в системі встановлено два фільтри загальний $\Delta p_d = 0,002$ МПа.

Загальні втрати на гідроапаратах в системі краплинного поливу:

$$\Delta p_d = 0,009 + 0,03 + 0,002 = 0,041 \text{ МПа.}$$

Загальні втрати всієї гідросистеми:

$$\Delta p = 0,004489 + 0,000848 + 0,041 = 0,046 \text{ МПа.}$$

Підбір гідравлічного обладнання

- Підібрано насосний агрегат Comet MP30 (Рис 2.14), технічні характеристики наведені в таблиці 2.6:

Таблиця 2.6. Характеристика насоса

Оберти електродвигуна об/хв	Витрата (Q л/хв) при тиску $p = 0$ бар	Витрата (Q л/хв) при тиску $p = 10$ бар	Витрата (Q л/хв) при тиску $p = 20$ бар	Витрата (Q л/хв) при тиску $p = 30$ бар
400	23,3	21,4	21,3	21,2
450	26,3	24,2	24	23,8
500	29,3	26,9	26,6	26,4
550	32	29,4	29,2	29,2

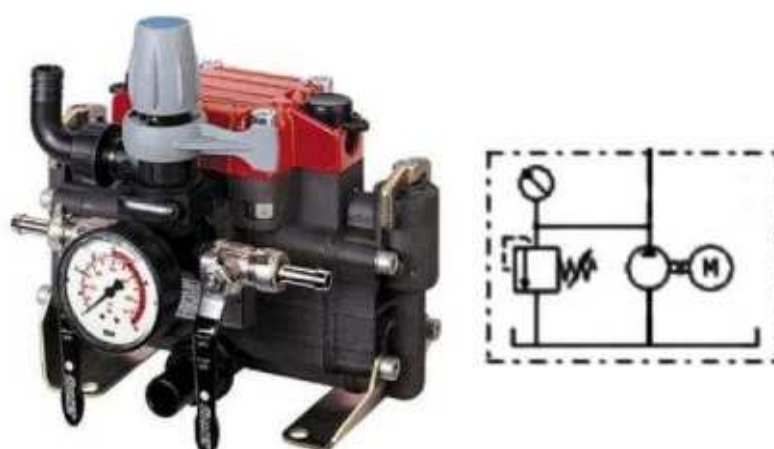


Рис.2.14. Насосний агрегат Comet MP30 [47]

- Редуктор тиску goetze-481 (Рис 2.15):



Рис.2.15 Редуктор тиску goetze-481 [48]

Характеристика редуктора тиску (Рис 2.16):




	Розмір клапана від DN 15 до DN 50 від 1/2" до 2"
	Тиск Тиск на вході: до 40 бар, Тиск на виході: від 0,5 бар до 15 бар
	температура від -20 °C до 120 °C

Рис.2.16 Характеристика редуктора тиску goetze-481

Редуктор тиску «goetze-481» підходить для системи зволоження повітря та для краплинного поливу [43].

- Регулятор витрати РПМ-102 (Рис 2.17):

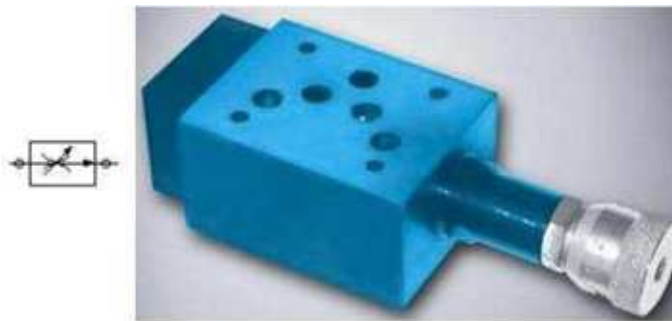


Рис.2.17 Регулятор витрати РПМ-102 [45]

Характеристика регулятора витрати: умовний прохід, мм: 10; мінімально допустима різниця між тисками на вході та виході:

1. при витраті 0,1 л/хв, МПа: 0,3.
2. при витраті 0,1 л/хв до 20 л/хв, МПа: 0,5.
3. при витраті вище 20 л/хв, МПа: 1,0.

Перепад тиску при проходженні номінальної витрати через зворотній клапан, МПа, не більше: 0,6.

Регулятор витрати РПМ-102 підходить для системи зволоження повітря та для краплинного поливу [43].

- Фільтр промивний Resideo (Honeywell) FF06-1/2AA DN15 для системи зволоження повітря (Рис 2.18)



Рис.2.18 Фільтр промивний Resideo (Honeywell) FF06-1/2AA DN15 для системи зволоження повітря [49]

Характеристика фільтра:

Тип з'єднань: зовнішні різьбові.

Монтажне положення фільтра: встановлюється на горизонтальному трубопроводі чашею вниз.

Розмір комірки фільтра: 100 мкм.

Приєднувальний розмір: 1/2" (DN15).

Продуктивність: 1,5 м³/год.

Робочий тиск: 16 бар.

Габаритні розміри (ДхВ): 140x158 мм.

Вага: 0,7кг.

- Фільтр для краплинного поливу Saleplas 1 (Рис 2.19):



Рис.2.19 Фільтр для краплинного поливу Saleplas 1 [46]

Характеристика фільтра:

Перепад тиску на чистому фільтрі, бар 0.1.

Площа фільтруючої поверхні, см² 180.

Продуктивність, м³/год до 6.

Рекомендована промивка при перепаді, бар 0.7 - 0.8.

Ступінь фільтрації, мкм 130.

Тиск вхідної води, бар до 8.

В системі краплинного поливу застосовується два таких фільтри.

- Розподільник для системи краплинного поливу Hunter PGV-100G-B (Рис 2.20)



Рис.2.20 Розподільник для системи краплинного поливу Hunter PGV-100G-B

[50]

Діаметр: 1" ВР x 1" ВР.

Пропускна здатність: 0,05 - 9 м³/год (0,7 - 150 л/хв).

Рекомендований тиск: 1,5 - 10 бар.

- Розподільник для системи зволоження повітря ODE 21W4ZV250 (Рис 2.21)



Рис.2.21 Розподільник для системи зволоження повітря ODE 21W4ZV250 [51]

- Гідравлічний замок Runxin RX p1 для системи зволоження повітря (Рис 2.22) [15]



Рис.2.22. Гідравлічний замок Runxin RX p1 для системи зволоження повітря

Характеристика гідравлічного замка:

Діаметр крана: $\frac{3}{4}$.

Номінальний тиск: 10 бар.

Час спрацювання: 3 сек.

- Форсунка туманоутворення

На рисунку 2.23 показана форсунка UM50M.



Рис.2.23. Форсунка системи туманоутворення [52]

Характеристика форсунки:

Витрата: 2-6 л/хв.

Тиск: від 3 до 80 бар.

Кут розпилення: 85 - 100°.

Матеріал: нержавіюча сталь.

Вбудований зворотній клапан для запобігання виток рідини.

2.7. Загальну структуру та комп'ютерна модель тепличного об'єкта

Проаналізувавши роботу та структуру підсистем адаптивної системи мікроклімату теплиці було розроблено загальну структуру об'єкта та 3-D модель теплиці з основними інженерними системами (рис.2.24) [53].



Рис.2.24. Загальна структура теплиці

Висновки по розділу

- Розглянуто загальну структуру теплиці.
- Розроблено підструктури пневмо-гідравлічної мехатронної системи (системи вентиляції та рециркуляції, провітрювання вікон, обігріву, поливу та зволоження).
- Розраховано системи вентиляції та провітрювання вікон. Підібрано вентилятор на 1400 м³/год, ВЦ 10-28, та визначено максимальний крутний момент для підбору привода відкриття вікон провітрювання. Підібрано пневматичний циліндр FESTO CRHD-32 та розподільний клапан VUVS-25-S.
- Розраховано необхідну кількість тепла для обігріву теплиці та підібрано обладнання: нагрівач на 6,0 кВт, НК 400x200-6,0-3.
- Розраховано та підібрано кількість форсунок системи туманоутвориння для підтримання сталого рівня вологості в середині теплиці та гідроапаратуру для системи поливу.
- Розроблено загальну структуру об'єкту дослідження.

РОЗДІЛ 3. ЗАДАЧІ ТА ВИМОГИ ДО ПНЕВМО-ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ

3.1. Фізика тепло-масообмінних процесів в середині тепличного об'єкта

Пневмо-гідравлічна мехатронна система має забезпечувати баланс певних параметрів мікроклімату шляхом керування приводами вікон провітрювання та зашторювання, приводами заслінок повітропроводів, засобами зволоження, вентилятором та нагрівачами і повинна підтримувати сталий температурний режим в середині теплиці незалежно від впливу зовнішніх факторів.

Для розробки системи і алгоритму керування необхідно мати залежності змін теплового обміну між теплицею та оточуючим повітряним та рідинним середовищем, та інших параметрів у часі, та з врахуванням прогнозованих змін параметрів оточуючого середовища. Це дозволить визначити додаткову теплову потужність та напрям стабілізаційного теплового потоку, та відхилення інших параметрів для збереження мікроклімату в теплиці.

На першому етапі було проведено аналіз фізичних процесів, що відбуваються в середині теплиці, з метою визначення вимог до математичної моделі об'єкту керування.

Теоретичне обґрунтування тепло-масообмінних процесів в теплиці базується на балансі теплових потоків повітря з врахуванням конвекційних потоків та впливу системи повітропроводів. Рівняння теплового балансу енергії, що впливає на зміну температури повітря всередині теплиці має вигляд [32]:

$$\rho * V * C_{\text{тепл}} * \frac{dT(t)}{dt} = Q_{\text{надх}} - (Q_{\text{втрати}} + Q_{\text{свіж}}), \quad (3-1)$$

де:

V – об'єм повітря, м^3 ;

$C_{\text{тепл}}$ – питома теплоємність повітря, $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

$T(t)$ – температура повітря всередині теплиці, $^\circ\text{C}$;

$Q_{\text{надх}}$ – теплові надходження від системи обігріву кВт ;

$Q_{\text{втрати}}$ – втрати теплоти кВт;

$Q_{\text{свіж}}$ – втрати теплоти на обігрів свіжого повітря, кВт.

Так як в рівняння теплового балансу входять теплова енергія системи обігріву, втрати теплоти через поверхню теплиці та втрати теплоти на обігрів свіжого повітря було розглянуто кожну складову окремо.

Теплова енергія системи обігріву описується:

$$Q_{\text{пост}} = -(G_{\text{тепл}} * C_{\text{тепл}} (T_{\text{поч}} - T_{\text{кін}})) \quad (3-2)$$

де:

$G_{\text{тепл}}$ – витрати теплоносія, кВт;

$T_{\text{поч}}, T_{\text{кін}}$ – температура теплоносія на вході і виході теплообмінника, °C;

$T_{\text{поч}} - T_{\text{кін}}$ – різниця температур на вході і виході з теплообмінника, °C.

Теплові втрати через конструкцію теплиці з полікарбонату з врахуванням розмірів теплиці визначає залежність [32,54,55]:

$$Q_{\text{огор}} = \sum k * F * (T_{\text{в}} - T_{\text{н}}) \quad (3-3)$$

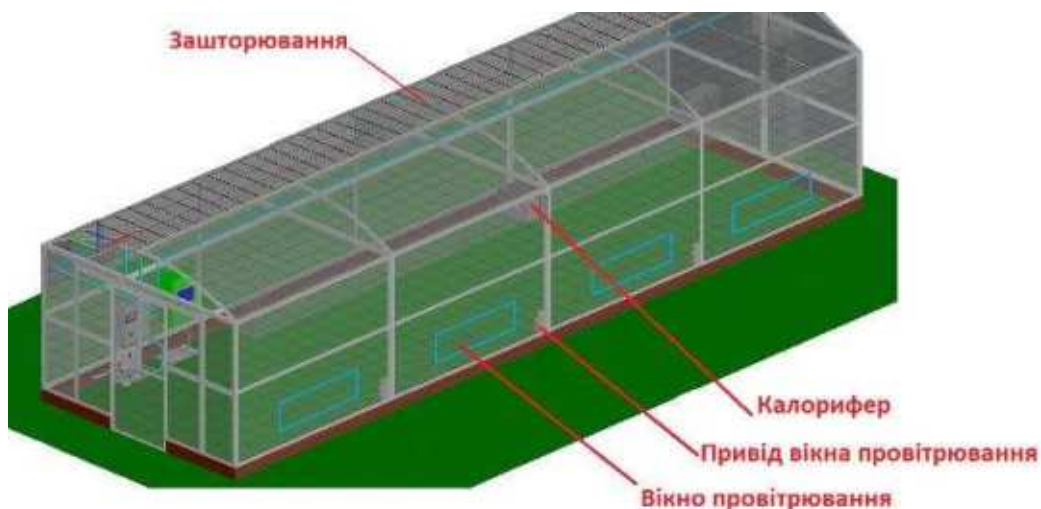
де:

k – коефіцієнт теплопередачі полікарбонату, Дж/м²;

F – площа огорожі, м²;

$T_{\text{в}} - T_{\text{н}}$ – перепад температури повітря, °C;

$T_{\text{н}}$ – температура повітря зовнішня, °C.



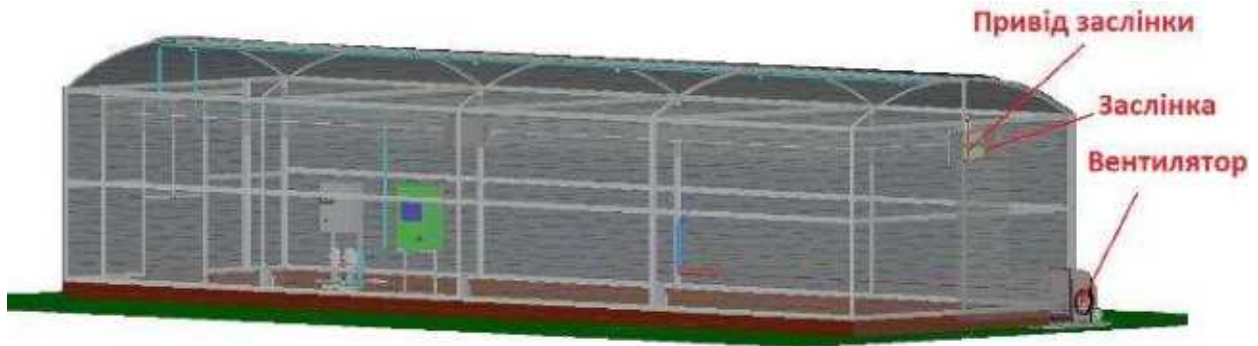


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд моделі тепличного об'єкта

Визначення коефіцієнту теплопередачі між накриттям і внутрішнім повітрям теплиці. Середня швидкість руху повітря, u , всередині теплиці, яка використовувалася в цьому аналізі (рис. 3.1), була оцінена приблизно на рівні 0,1 м/с, що відповідає вимогам до ведення тепличного господарства. Тому було розглянуто критерій Монтейта [4,7], який передбачає, що чиста вільна конвекція має місце, якщо $Gr/Re^2 > 16$ (Gr - число Грашофа), чиста вимушена конвекція має місце, якщо $Gr/Re^2 < 0.1$ і змішана конвекція має місце, якщо $0.1 < Gr/Re^2 < 16$. Застосування цих критеріїв до теплиці (рис. 3.1), використовуючи різні значення різниці $(T_c - T_a)$ призводить до того, що при $(T_c - T_a) < 7^\circ C$ має місце механізм змішаної конвекції всередині теплиці. Відповідне співвідношення наведене в роботі [54,32] для оцінки коефіцієнту теплопередачі (на основі механізму змішаної конвекції) в денний час має вигляд:

$$h_{c-am} = 1,95 * (T_c - T_{am})^{0.3}, \quad (3-4)$$

$$(T_c - T_{am}) \leq 11,1^\circ C$$

де:

h_{c-am} – коефіцієнт теплопередачі між покриттям теплиці та внутрішнім повітрям теплиці.

Рівняння (3-4) справедливе для $(T_c - T_a)$, проте не було знайдено жодного співвідношення, яке б виражало цей коефіцієнт в денний час для різниці температур, що перевищує $11,1^\circ C$.

Визначення коефіцієнту теплопередачі між підлогою і внутрішнім повітрям теплиці. Для оцінки коефіцієнта теплопередачі були використані різні

співвідношення [32, 54]. Всі ці співвідношення базуються на вільному або вимушеному конвекційному механізмі теплообміну між підлогою теплиці і внутрішнім повітрям. Розглянуто залежність, яка розглядає змішаний конвекційний механізм теплопередачі для оцінки коефіцієнту наступним чином:

$$h_{s-a} = 1,52 * (T_s - T_a)^{0.33} + 5,2 \left(\frac{\bar{u}}{L} \right)^{0.5}, \quad (3-5)$$

де:

h_{s-a} – коефіцієнт теплопередачі між ґрунтом та внутрішнім повітрям теплиці;

T_s – температура поверхні ґрунту, °C;

\bar{u} - середня швидкість руху повітря всередині теплиці, м/с;

L - характерна довжина підлоги теплиці ($L = 7$ м).

Конвективний теплообмін між покриттям теплиці і зовнішнім повітряним та рідинним середовищем, $(Q_c - Q_{am})$, і між поверхнею підлоги і внутрішнім повітрям, $(Q_s - Q_a)$ визначаються відповідно до різниці температур, площ поверхонь та відповідних коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих за допомогою рівнянь 1-3, відповідно.

Тепловіддача, пов'язана з витоками інфільтрованого повітря, Q_{inf} , визначається за формулою [54]:

$$Q_{inf} = 2V_g * N_{inf} \frac{(\rho C_p)_a}{3600} (T_a - T_{am}), \quad (3-6)$$

де:

V_g – об'єм теплиці, м³;

N_{inf} - кількість змін інфільтрованого повітря за годину;

C_p - поправочний коефіцієнт.

Коефіцієнт 2 включений тому, що інфільтроване повітря виходить з теплиці при середній температурі $(T_a + T_{am})/2$. Таким чином, коефіцієнт теплопередачі, пов'язаний з інфільтраційним повітрям, h_{inf} , визначається за формулою:

$$h_{inf} = \frac{V_g * (\rho C_p)_a}{600A_c}, \quad (3-7)$$

де:

h_{inf} – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²К;

A_c – площа поверхні тепличного покриття, м².

Властивості повітря теплиці вважаються еквівалентними властивостям сухого повітря і водяної пари. Чистий обмін тепловим випромінюванням між покриттям теплиці з випромінювальною здатністю T_{am} і температурою T_c може бути виражений як [54]:

$$\begin{aligned} q_{c-sky} &= \varepsilon_c - A_c F_{c-sky} \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) = \\ &= A_c h_r (T_c - T_{am}), \end{aligned} \quad (3-8)$$

де:

q_{c-sky} - коефіцієнт огляду між покриттям і зовнішнім повітряним та рідинним середовищем (припускаючи, що $q_{c-sky}=1$ для однопролітної теплиці);

ε_c - поверхневе випромінювання;

F_{c-sky} – коефіцієнт огляду між покриттям та небом;

σ - постійна Стефана-Больцмана;

h_r – коефіцієнт радіаційної теплопередачі, м²*К/Вт.

Для випадку, коли T_{am} дорівнює T_{sky} , коефіцієнт радіаційної тепловіддачі h_r визначається за формулою [54]:

$$h_r = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 - T_{sky}^2) (T_c + T_{sky}), \quad (3-9)$$

Визначення загального коефіцієнту теплопередачі. Опір теплопередачі між внутрішньою та зовнішньою сторонами теплиці (рис. 3.2 а) включає в себе п'ять компонентів [54]: (1) опір тепловому випромінюванню r_1 ($=1/\text{год}$) між зовнішньою поверхнею покриття і небом, (2) конвективний опір r_2 ($=1/h_{c-am}$) між зовнішньою поверхнею покриття і навколишнім повітрям, (3) конвективний опір r_3 ($=1/h_{c-a}$) між внутрішньою поверхнею покриття і повітрям теплиці, (4) опір інфільтрованого повітря r_4 ($=1/h_{inf}$) між внутрішнім і зовнішнім повітрям і (5) провідний опір r_5 ($=d_c/k_c$) через товщину покриття. Температури внутрішньої та зовнішньої поверхні кришки (T_{ci} і T_{co}) майже однакові, і було враховано еквівалентну температуру кришки T_c . Таким чином, опір d_c/k_c (r_5) можна знехтувати (тобто нехтувати градієнтом температури по товщині покриття) без будь-якої значної похибки у визначенні U .

З'єднання термоопорів у вигляді зірки, показане на рис. 3.2а, було перетворено на з'єднання трикутником з еквівалентними трьома опорами, з'єднаними паралельно між внутрішнім і зовнішнім температурними потенціалами (T_a і T_{am}), як показано на рис. 3.2б [54].

Відповідно до електричної аналогії теплової мережі, рис. 3.2б, загальний коефіцієнт теплопередачі задається формулою:

$$U = \frac{1}{(2r_1 + r_2 + r_3 + r_5 + \frac{r_1(r_3 + r_5)}{r_2} + \frac{r_1 r_2}{(r_3 + r_5)})} + \frac{1}{(r_2 + r_3 + r_5 + \frac{r_2(r_3 + r_5)}{r_1})} + \frac{1}{r_4}, \quad (3-10)$$

де:

U – загальний коефіцієнт теплопередачі, Дж/м²;

r – термічний опір, м²·К/Вт.

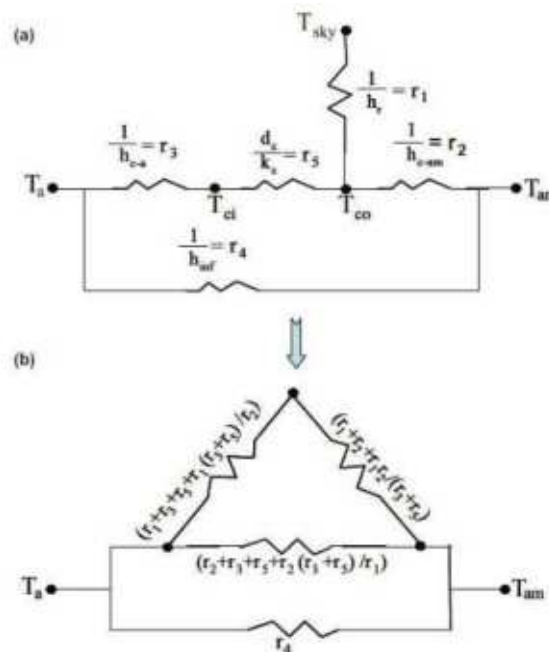


Рис. 3.2. Електрична аналогія з опорами теплової мережі для передачі тепла між внутрішнім повітрям теплиці та зовнішнім повітряним та рідинним навколишнім середовищем. (а) - фактичні опори мережі, (б) - еквівалентні перетворені опори. [54]

Стаціонарний енергетичний баланс був застосований до покриття теплиці та поверхні мульчованого ґрунту, відповідно, наступним чином [54]:

$$\begin{aligned} S_a + R_{CE} + R_{SE} + R_{skyE} + q_{v-c} - \varepsilon_c \sigma T_c^4 - \\ - Q_{c-a} = 0.0, \\ S_n + q_n - Q_{s-a} - D = 0.0, \end{aligned} \quad (3-11)$$

де:

S_a - сонячне випромінювання, поглинене покриттям, Вт;

R – відбиття теплового випромінювання;

q_{v-c} - чистий обмін тепловим випромінюванням між водяною парою та покриттям, Вт;

Q_{c-a} – конвективний тепловий потік від покриття до внутрішнього повітря, Вт;

S_n - чистий потік сонячної радіації на поверхні ґрунту, Вт;

q_n - чистий потік теплового випромінювання на поверхні ґрунту, Вт;

Q_{s-a} - конвективний тепловий потік від поверхні ґрунту до внутрішнього повітря, Вт;

D - струмопровідний потік в глибину ґрунту, що визначається за формулою:

$$D = \lambda_s A_s \frac{T_s - T_\infty}{H}, \quad (3-12)$$

де:

λ_s - коефіцієнт теплопровідності ґрунту, м²*К/Вт;

T_∞ - температура ґрунту на певній глибині H (м), на яку не впливає зміна умов у теплиці, °С.

Так як майже вся частина теплообміну з навколишнім повітряним та рідинним середовищем відбувається через стінки огорожувальної конструкції необхідно враховувати додатковий теплообмін між водяною парою та покриттям теплиці. Детально розглянуто обмін тепловим випромінюванням між водяною парою та покриттям. Температура краплі оновлюється відповідно до теплового балансу, який пов'язує відчутну зміну тепла в краплі з конвективним і прихованим теплообміном між краплями і суцільною фазою [55,56]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3-13)$$

де:

c_p - теплоємність краплі, Дж/кг·К;

T_p - температура краплі, К;

h - коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м²/К;

T_∞ - температура суцільної фази, К;

$dm_p=dt$ - швидкість випаровування, кг/с·м²;

h_{fg} - прихована теплота, Дж кг⁻¹;

ε_p - випромінювальна здатність частинок, безрозмірна.

Швидкість випаровування визначається градієнтною дифузією, причому потік краплинної пари в газову фазу пов'язаний з градієнтом концентрації пари між поверхнею краплі та повітрям [55,56]:

$$N_{i'} = k_c(C_{i',s} - C_{i',\infty}) \quad (3-14)$$

де:

N - молярний потік пари, мольм⁻² с⁻¹;

k_c - коефіцієнт масопередачі, м с⁻¹;

$C_{i,s}$ - концентрація пари на поверхні краплі, мольм⁻³;

$C_{i,\infty}$ - концентрація пари в повітрі, моль м⁻³.

Концентрацію пари на поверхні краплі оцінюють, припускаючи, що парціальний тиск пари на межі розділу фаз дорівнює тиску насиченої пари P_{sat} при температурі краплі, T [55,56]:

$$C_{i',s} = \frac{P_{sat}(T)}{RT} \quad (3-15)$$

де:

R - універсальна газова стала.

Концентрація пари в повітрі відома з розв'язку рівняння переносу для виду i розрахунків масопереносу [55,56]:

$$C_{i',\infty} = X_{i'} \frac{P_{op}}{RT_\infty} \quad (3-16)$$

де:

X - місцева об'ємна мольна частка виду i ;

P_{op} - робочий тиск, Па;

T_{∞} - місцева температура повітря, °C.

Визначення теплових витрат на обігрів припливного повітря виконано за залежністю:

$$Q_{\text{свіж}} = G_{\text{свіж}} * C_{\text{пов}} (T_{\text{г}} - T_{\text{н}}) , \quad (3-17)$$

де:

$G_{\text{свіж}}$ - витрата свіжого повітря для вентиляції теплиці, кг/с;

$C_{\text{пов}}$ - питома теплоємність повітря, Дж/кг·град;

Після розгляду рівняння теплового балансу було розглянуто аеродинамічні процеси по рівнянням Нав'є-Стокса:

$$\rho * [\frac{dW_x}{dt} + \frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_x}{dy} + \frac{dW_x}{dz}] = \rho g_x - \frac{dp}{dx} + \mu (\frac{d^2W_x}{dx^2} + \frac{d^2W_x}{dy^2} + \frac{d^2W_x}{dz^2}) \quad (3-18)$$

$$\rho * [\frac{dW_y}{dt} + \frac{dW_y}{dx} + \frac{dW_y}{dy} + \frac{dW_y}{dz}] = \rho g_y - \frac{dp}{dy} + \mu (\frac{d^2W_y}{dx^2} + \frac{d^2W_y}{dy^2} + \frac{d^2W_y}{dz^2}) \quad (3-19)$$

$$\rho * [\frac{dW_z}{dt} + \frac{dW_z}{dx} + \frac{dW_z}{dy} + \frac{dW_z}{dz}] = \rho g_z - \frac{dp}{dz} + \mu (\frac{d^2W_z}{dx^2} + \frac{d^2W_z}{dy^2} + \frac{d^2W_z}{dz^2}) \quad (3-20)$$

де:

$\rho (\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_x}{dy} + \frac{dW_x}{dz})$ – конвективний член;

ρg_x – гравітаційний член;

$\frac{dp}{dx}$ – зміна тиску в потоці;

$\mu (\frac{d^2W_x}{dx^2} + \frac{d^2W_x}{dy^2} + \frac{d^2W_x}{dz^2})$ – дисипативний член;

g – прискорення вільного падіння;

μ – динамічна в'язкість середовища;

P – тиск, Па;

$W_x W_y W_z$ – векторне поле швидкостей;

t – час, год.

Для чисельного розрахунку руху повітря за рівнянням Нав'є-Стокса було додано рівняння нерозривності для стисливого середовища:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d(\rho W_x)}{dx} + \frac{d(\rho W_y)}{dy} + \frac{d(\rho W_z)}{dz} = 0 . \quad (3-21)$$

Процеси змін температурного режиму в тепличному об'єкті описується залежністю:

$$\frac{dT}{dt} + W_x * \frac{dT}{dx} + W_y * \frac{dT}{dy} + W_z * \frac{dT}{dz} = \frac{\lambda}{C_p * \rho} * \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right), \quad (3-22)$$

де:

$W_X * \frac{dT}{dx} + W_Y * \frac{dT}{dy} + W_Z * \frac{dT}{dz}$ - конвективний член;

T – температура, °C;

$W_X W_Y W_Z$ – векторне поле швидкостей;

t – час.

Зміна вологості повітря в теплиці в основному спричинена вентиляцією та транспірацією рослин. Величина зміни вологості повітря повинна відповідати наступному рівнянню [57]:

$$\Delta H = \Delta H_{air} - \Delta H_{plant}, \quad (3-23)$$

де:

ΔH - зміна пари всередині теплиці, кг/м³;

ΔH_{air} - зміна пари, спричинена вентиляцією, кг/м³;

ΔH_{plant} - зміна вологи за рахунок транспірації рослин, випаровування ґрунтової води та інших джерел вологи, кг/м³.

Розрахунок відносної вологості повітря за допомогою мікро-метеорологічної моделі забезпечено рівнянням [57]:

$$RH = \frac{e_a}{e_w}, \quad (3-24)$$

де:

RH - відносна вологість, %;

e_a - тиск пари, Па;

e_w - тиск насиченої пари при тій самій температурі, Па.

Визначення абсолютної вологості наведено у рівнянні (3-25), при цьому значення e_a може бути представлено у вигляді рівняння (3-26):

$$\rho_v = \frac{e_a}{R_v T}, \quad (3-25)$$

$$e_a = \rho_v - R_v - T, \quad (3-26)$$

де:

ρ_v - маса пари на кубічний метр повітря, кг/м³;

R_v - питома газова стала для водяної пари, що дорівнює 461,5.

Таким чином, узагальнений процес переносу водяної пари повітрям, може бути описаний за допомогою рівнянь (25-26), і матиме вигляд [57]:

$$H = \frac{R H e_w}{R_v T - Q}, \quad (3-27)$$

де:

H - маса водяної пари, що переноситься повітрям, кг/м³;

Q - об'єм повітря в теплиці, м³.

Отже, в процесі вентиляції теплиці зміна вмісту водяної пари, спричинена масообміном внутрішнього та зовнішнього повітря, залежить від температури, відносної вологості та вентиляційного об'єму внутрішнього та зовнішнього повітря[57]:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{air}} &= Q_{\text{in}} \times (A H_{\text{outside}} - A H_{\text{inside}}) = \\ &= ((e_w Q_{\text{in}} R H_{\text{outside}}) / R_v T_{\text{outside}} - (R H_{\text{inside}} / R_v T_{\text{inside}})), \end{aligned} \quad (3-28)$$

де:

$A H_{\text{outside}}$ - абсолютна вологість зовнішнього припливного повітря, кгводи/кгповітря;

$A H_{\text{inside}}$ - абсолютна вологість припливного повітря в теплиці, кгводи/кгповітря;

$R H_{\text{inside}}$ - відносна вологість зовнішнього припливного повітря, %;

$R H_{\text{outside}}$ - відносна вологість повітря в теплиці, %;

T_{outside} - температура зовнішнього повітря, °C;

T_{inside} - температура повітря в теплиці, °C.

Рівняння масового балансу води у теплиці:

$$\rho * V * \frac{dT(t)}{dt} = G_{\text{свіж}} * X_{\text{свіж}} - G_{\text{витр}} * X_{\text{витрат}} + G_{\text{пар}}, \quad (3-29)$$

де:

$X_{\text{витр}}$ - абсолютна вологість повітря, кгводи/кгповітря;

$X(t)$ - абсолютна вологість повітря в атмосфері теплиці, кгводи/кгповітря;

$G_{\text{витр}}$ - витрата повітря, кг/с;

$X_{\text{свіж}}$ - абсолютна вологість свіжого повітря, кгводи/кгповітря;

$G_{\text{пар}}$ – витрата пара, кг/с.

За формулою Максвелла ефективність зволоження повітря:

$$\frac{dm_k(\tau)}{d\tau} = \frac{4 * \pi * r_k(\tau) * D(\theta) * m_w [P_H(\theta_w) - P(d)]}{R * T}, \quad (3-30)$$

де:

m_k, r_k – маса і радіус краплі кг, м;

$D(\theta)$ – коефіцієнт дифузії пари повітря;

m_w, R – молекулярна вага води у газоподібному стані та газова стала пари;

T – температура пари, К;

P_H, P – парціальний тиск пари над поверхнею краплі та в оточуючому середовищі, Па.

За результатами аналізу побудовано математичну модель зміни температури та вологості в тепличному об'єкті замкнутого об'єму [55,56]:

$$\frac{dt_v}{d\tau} = \frac{2G_n}{V_v} (t_g - t_v) - \frac{k_1 F_t (t_v - t_p)}{C_v V_p \rho_p}, \quad (3-31)$$

$$\frac{dt_p}{d\tau} = \frac{k_1 F_t (t_v - t_p) - k_2 F_c (t_p - t_z)}{C_v V_p \rho_p}, \quad (3-32)$$

$$\frac{m_v}{G_v} * \frac{dM_p}{d\tau} + M_p = G_w * 10^3 + G_v d_1, \quad (3-33)$$

де:

k_1, k_2 – коефіцієнти теплопередачі через стінку та матеріалу поверхні теплиці;

$t_v - t_p$ – температура води та повітря теплиці, °С;

F_t – поверхня теплообміну, м²;

V_p – об'єм тепличного об'єкту, м³;

F_c – поверхня заскленої теплиці, м².

3.2. Задачі для комп'ютерного моделювання теплиці середнього об'єму

Першою задачею є тестування моделі і визначення змін параметрів мікроклімату під дією еталонного зовнішнього впливу: температурного, повітря-обмінного, швидкісного, вологісного. Модель під впливом кожного з параметрів

має визначати функцію стабілізації або змін основних параметрів мікроклімату в часі за означений термін. Для цього заплановано провести аналіз змін поля певного параметру в об'ємі теплиці, визначити максимальні та мінімальні значень, визначення координат особливих зон, побудова функцій змін параметру в часі.

Другою задачею є визначення полів розподілення тиску, швидкості, температури, вологості по об'єму теплиці. Оскільки автоматизована система мікроклімату теплиці має забезпечувати певні граничні параметри у всьому об'ємі теплиці, контроль означених параметрів відбуватиметься за допомогою необхідної кількості датчиків, розташованих відповідним чином. Тобто, на функції спрощеного моделювання припадає задача визначення кількості і розташування датчиків контролю.

Третя задача полягає в отриманні прогнозованих змін параметрів впродовж певного терміну. Оскільки пневмо-гідролічна мехатронна система керування мікрокліматом має забезпечувати постійне значення вологості повітря у всьому об'ємі теплиці, необхідно спрогнозувати очікувані зміни вологості повітря при зміні температури зовнішнього повітряного та рідинного середовища. Для цього встановлено систему туманоутворення, яка буде підтримувати вологість повітря на необхідному рівні. Тобто, на функції дослідження припадає задача визначення необхідної тривалості, кількості та продуктивності форсунок. Для цього, шляхом моделювання, має бути визначена зміна вологості повітря в теплиці впродовж доби. Наступним кроком має бути проведено інтегрування площі продуктивності форсунок до середнього значення необхідної кількості водяної пари в замкненому об'ємі теплиці. Це має дозволити розрахувати втрати водяної пари впродовж доби.

3.3. Вимоги до моделювання та комп'ютерної моделі теплиці

Комп'ютерне моделювання має дозволити визначити характеристики процесів теплообміну, масопереносу, розповсюдження вологи, стабілізації

температури, стабілізації поля швидкостей та тиску задля побудови алгоритму керування виконавчими пристроями пневмо-гідравлічної мехатронної системи, що забезпечить знаходження параметрів мікроклімату у визначених межах.

Модель теплиці повинна враховувати основні процеси, що відбуваються під впливом зовнішніх чинників, вплив засобів керування, геометричні та просторові характеристики об'єкту та матеріал огорожувальної конструкції теплиці.

Іншими словами, результати моделювання за допомогою прикладних програм чисельного розрахунку, мають надати інформацію щодо процесів в теплиці для побудови системи керування форсунками системи туманоутворення, приводами вікон провітрювання та зашторювання, приводами заслінок каналів, вентиляторами та нагрівачами, здатної підтримувати сталу температуру та вологість повітря в середині теплиці незалежно від впливу зовнішніх факторів.

Результати моделювання повинні надати залежності чи характеристики, що дозволять визначати:

- термін стабілізації поля швидкостей всередині теплиці при надходженні потоку зовнішнього повітря заданої витрати;
- термін стабілізації тиску в теплиці при надходженні потоку зовнішнього повітря заданої витрати;
- баланс потоку теплової енергії між теплицею і зовнішнім повітрям та рідинним середовищем;
- розподіл температури в просторі теплиці;
- баланс вологості в теплиці при надходженні потоку зовнішнього повітря заданої витрати з відомими значеннями температури і вологості;
- розподіл вологості в просторі теплиці.

Висновки по розділу

- Розроблено математичну модель робочих процесів в теплиці, придатну для моделювання процесу функціонування теплиці.

- Визначено задачі для комп'ютерного моделювання теплиці середнього об'єму, які дадуть можливість відслідкувати зміни параметрів мікроклімату під дією еталонного зовнішнього впливу: температурного, повітря-обмінного, швидкісного та вологості повітря.
- Визначено вимоги до математичного моделювання та комп'ютерної моделі теплиці, які дозволять визначити характеристики процесів теплообміну, масопереносу, розповсюдження вологи, стабілізації температури, стабілізації поля швидкостей

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО-МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕПЛИЦІ СЕРЕДНЬОГО ОБ'ЄМУ

4.1. Комп'ютерна модель тепличного об'єкта

При створенні моделі було враховано процеси, що відбуваються в об'єкті керування, їх математичні описи і межі застосування, параметри та коефіцієнти, необхідні для розрахунків [86].

Для модельного опису теплиці прийняті наступні змінні величини: тиск, температура, швидкість потоку повітря, параметри повітря та час [58, 59]. Модель створена на основі наступного [31,32, 33]:

1. Модель описує тепличний об'єкт, як заданий об'єм повітря, обмежений стінами, дахом та підлогою. Просторовий розподіл змінних параметрів, що описують мікроклімат, не враховуються.
2. Біомаса тепличного об'єкта не враховується, вона є сталим значенням.
3. Управління розглядається як квазістаціонарний процес.

Температурний режим в середині замкненого тепличного об'єму має бути рівномірним та сталим, незалежним від впливу зовнішніх факторів.

Краєві умови. Прийнято, що при початку моделювання температура в тепличному об'єкті розподілена рівномірно та має стале значення. [31,32, 33].

Комп'ютерна модель теплиці середнього об'єму.

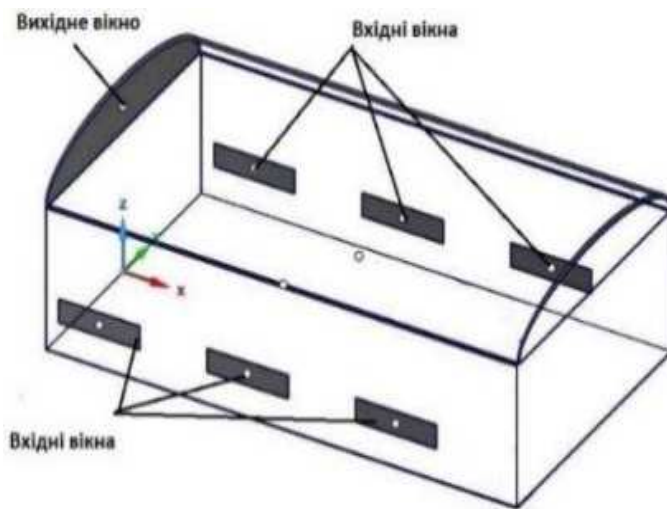
Моделювання тепличного об'єкта проведено в пакеті Ansys. На рисунку 4.1 зображено інтерфейс пакету Ansys та змінні параметри [58]. При моделюванні об'єкта було прийнято наступні фізичні параметри теплиці:

- Габаритні розміри – 7000x4000x1600 мм;
- Кількість вікон провітрювання – 8 шт;
- Габаритні розмір вікна провітрювання – 600x150 мм;
- Вікна розташовуються по боковим стінкам теплиці;
- Загальна площа теплиці – 28 м²;
- Об'єм тепличного об'єкта – 49 м³.

Вхідні значення для модельного дослідження:

$D1\{P1, v1, T1, \}$ – значення тиску, швидкості та температури повітря відповідно.

Процес моделювання мікроклімату тепличного об'єкта відбувається в безперервному часі.



а



б

Рис. 4.1. Модель тепличного об'єкта у середовищі Ansys: а – розміщення вікон провітрювання; б – введення початкових даних для моделювання

Регулювання розповсюдження теплових мас повітря забезпечується в моделі тепличного об'єкта за допомогою заслінки, встановленої у повітропроводі з нагрівачами. За дослідженнями, які взято за основу, регулювання здійснюється за рахунок зміни кута відкриття заслінки.

Значення параметрів $D1\{v1, T1, P1\}$ відповідають початковим значенням цих параметрів на рисунку 4.1б.

Для проведення тестового модельного експерименту було сформовано масив даних відповідно до задачі та основних параметрів об'єкта моделювання:

1 – початкове значення температури повітря всередині замкненого об'єму об'єкта дослідження;

2 – початкові значення температури повітря та швидкості на вході у вентиляційні вікна;

3 – значення тиску на виході з вентиляційного вікна.

В програмному забезпеченні Ansys генерується модель зміни параметрів мікроклімату (температури, швидкості та тиску повітря.

Для визначення функцій тепло-масообміну з оточуючим повітряним та рідинним середовищем в процесі функціонування теплиці було побудовано математичну модель в середовищі SOLIDWORKS (рис. 4.2) [62,71].

Краєві умови. Прийнято, що модельне дослідження охоплює одну добу. Повітряне та рідинне середовище тепличного об'єкта має початкову температуру 20°C, вологість – 70%. Процес дослідження мікроклімату тепличного об'єкта відбувається в безперервному часі. (рис. 4.2).

Розроблена і теоретично обґрунтована математична модель змін параметрів мікроклімату в тепличному об'єкті, яку реалізовано в пакеті Ansys Discovery та SOLIDWORKS, виконані тестові випробування моделі, показали її придатність до роботи при процесах тепло-масообміну під дією зовнішніх чинників.

4.2. Тестові випробування для підтвердження адекватності моделі

Для дослідження тепло-масообмінних процесів в теплиці середнього об'єму було розроблено тестову модель об'єкта (рис.4.2). На початковому етапі дослідження запропоновано встановити 36 точок контролю параметрів по всьому об'єму теплиці. Початкові дані задані для моделювання:

- початкове значення температури повітря 16 °C;
- швидкість повітря в замкнений об'єм теплиці - 0 м/с;
- швидкість повітря, яке подається через вікно провітрювання – 1,1 м/с;
- площа вікна провітрювання складає 0,35 м²;
- тиск на вході в вікно провітрювання 300 Па;
- температура потоку повітря, що надходить 22,0 °C.

На етапі тестових випробувань не було передбачено врахування змін зовнішніх чинників впродовж кожного тестового експерименту. Кожний тестовий експеримент передбачає визначення впливу тільки одного параметру при фіксованих значеннях всіх інших. Для аналізу впливу зовнішніх параметрів

Figure 10 is a 3D visualization of the thermal environment inside a vehicle cabin. The cabin is shown in a perspective view, with a color-coded temperature map overlaid. The map uses a scale from blue (cooler) to red (warmer). A legend on the left side of the image lists various thermal parameters and their values. A green arrow points to the front of the cabin, and three red arrows point to the side doors. The legend includes:

- 1. Ambient air temperature: 25°C
- 2. Passenger body temperature: 37°C
- 3. Passenger head temperature: 37°C

The cabin interior shows a mix of temperatures, with the highest temperatures (red) concentrated around the passenger area and the lowest temperatures (blue) near the front of the cabin.

На першому етапі дослідження проведено серію тестових експериментів: процес теплообміну в теплиці (розподіл температури), швидкість теплообміну та зміна тиску, а також час стабілізації температури, швидкості, тиску. Для цього було визначено зміну температури повітря в середині теплиці, якщо задано початкова температура повітря та температура потоку повітря, що надходить до об'єкта, а також швидкість потоку. Час стабілізації температури дав розуміння, коли починається процес тепловіддачі теплиці у навколишнє повітряне середовище.

101

при заданому прогнозу погоди. Для цього було взято попереднє дослідження та визначено час стабілізації температури в конкретний момент, що дає розуміння про втрату теплової потужності через стінки теплиці.

Наступним етапом було дослідження теплопередачі через огорожувальну конструкцію теплиці у навколишнє повітряне і рідинне середовище. Для цього було імітовано нагрів моделі теплиці до 20 °C після чого нагрів було вимкнено. Дослідження проводилося відповідно до зміни температури навколишнього повітряного середовища. Визначення втрати теплової потужності теплиці через огорожувальні конструкції теплиці є підґрунтям для визначення потужності нагрівачів для підтримування сталого температурного режиму в середині тепличного об'єкта.

П'ятим етапом дослідження було розподілення водяної пари в середині замкненого об'єму тепличного об'єкта. Для цього було задано температуру вхідного повітря та його вологість впродовж доби відповідно до прогнозу погоди. Для рівномірного зволоження наступним етапом дослідження було промодельована система розпилення, а саме форсунка. Результати цього дослідження дали характеристики по витраті водяної пари, по яким підібрані виконавчі пристрої.

Дані етапи дослідження дозволили зрозуміти процес теплообміну повітряних мас та розподілення вологості в середині теплиці, що є основою для розробки алгоритму керування пневмо-гідравлічною мехатронною системою [102].

Для проведення досліджень визначено зв'язок тепломасообінних процесів в теплиці з середовищем моделювання. Для цього було виявлено основні рівняння: аеродинамічних процесів, рівняння нерозривності стисливого середовища та рівняння переносу водяної пари. Зв'язок між рівняннями та параметрами, які задавалися в програмному середовищі наведені на рисунку 4.3 [75].

Тестова модель температурного режиму. Першим дослідженням було зміна температури повітря мікроклімату в часі (рис.4.4) [67,68,76,83]. Координати точок контролю X,Y,Z: 1 точка контролю 100мм, 750мм, 600мм; 2 точка контролю 100мм, 100мм, 600мм; 3 точка контролю 2000мм, 800мм, 600мм;

4 точка контролю 3800мм, 800мм, 600мм; 5 точка контролю 3800мм, 1300мм, 600мм; 6 точка контролю 100мм, 1200мм, 600мм.

Массовый расход на входе
Плотность потока массы на входе
Объемный расход на входе
Скорость на входе
Число Маха на входе
Массовый расход на выходе
Объемный расход на выходе
Скорость на выходе

Параметры потока

\dot{m} 0 kg/s

Равномерный

Течение с развитым профилем

Термодинамические параметры

p 101325 Pa

T -4.6 °C

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_x}{dt} + \frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_x}{dy} + \frac{dW_x}{dz} \right] = \rho g_x - \frac{dp}{dx} + \mu \cdot \left(\frac{d^2 W_x}{dx^2} + \frac{d^2 W_x}{dy^2} + \frac{d^2 W_x}{dz^2} \right)$$

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_y}{dt} + \frac{dW_y}{dx} + \frac{dW_y}{dy} + \frac{dW_y}{dz} \right] = \rho g_y - \frac{dp}{dy} + \mu \cdot \left(\frac{d^2 W_y}{dx^2} + \frac{d^2 W_y}{dy^2} + \frac{d^2 W_y}{dz^2} \right)$$

$$\rho \cdot \left[\frac{dW_z}{dt} + \frac{dW_z}{dx} + \frac{dW_z}{dy} + \frac{dW_z}{dz} \right] = \rho g_z - \frac{dp}{dz} + \mu \cdot \left(\frac{d^2 W_z}{dx^2} + \frac{d^2 W_z}{dy^2} + \frac{d^2 W_z}{dz^2} \right)$$

Alt (Газы)

Параметры потока

V_x 0 m/s

V_y 0 m/s

V_z 0 m/s

Термодинамические параметры

p 101325 Pa

T 20 °C

Потенциал давления (гравитации)

Привести к начальной точке

а

$$\frac{dT}{dt} + W_x \cdot \frac{dT}{dx} + W_y \cdot \frac{dT}{dy} + W_z \cdot \frac{dT}{dz} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \cdot \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right)$$

Alt (Газы)

Параметры потока

V_x 0 m/s

V_y 0 m/s

V_z 0 m/s

Термодинамические параметры

p 101325 Pa

T 20 °C

Потенциал давления (гравитации)

Привести к начальной точке

Параметры турбулентности

Характеристики течения

Модель

Трёхмерные виды

Анимация1

Проект(4)

Проект(5)

Проект(6)

Проект(7)

Проект(7)

Входные данные

Расчетная область

Подобласти течения

Подобласть течения 1

Материалы

Polycarbonate

Граничные условия

Массовый расход на входе 1

Цели

GG Минимум Температура (текущая среда) 1

GG Среднее Температура (текущая среда) 2

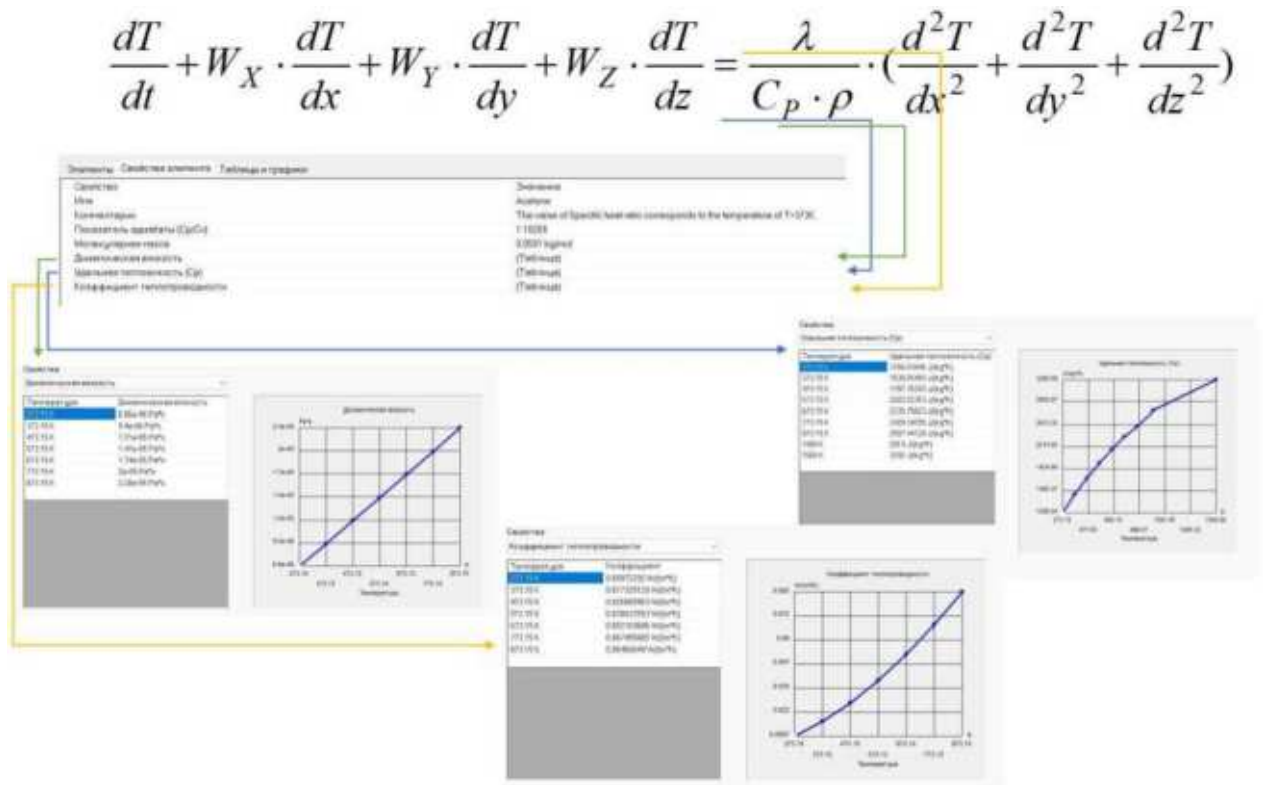
GG Максимум Температура (текущая среда) 3

GG Минимум Плотность теплового потока 4

GG Среднее Плотность теплового потока 5

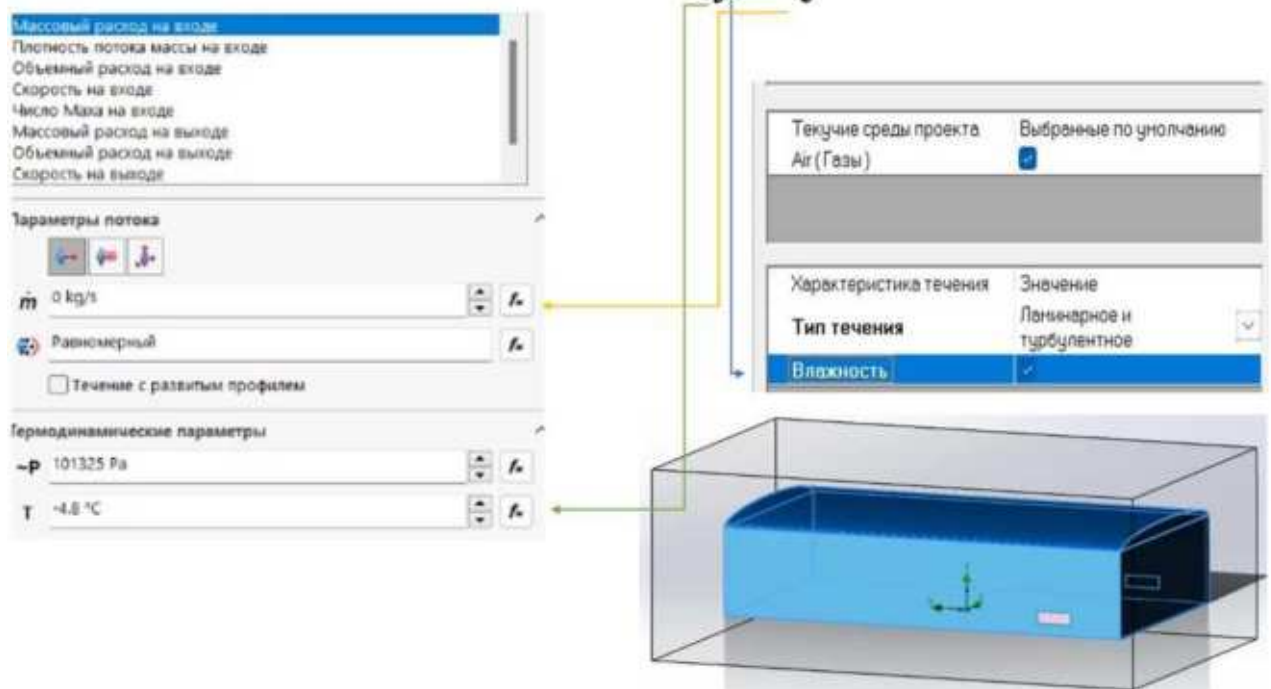
GG Максимум Плотность теплового потока 6

б



В

$$H = \frac{R H_{ew}}{R_v T - Q'}$$



Г

Рис.4.3. Зв'язок між рівняннями та параметрами, які задавалися в програмному середовищі: а - аеродинамічні процеси, Нав'є Стокса; б - рівняння нерозривності для стисливого середовища; в – рівняння теплообміну; г - перенесення водяної пари

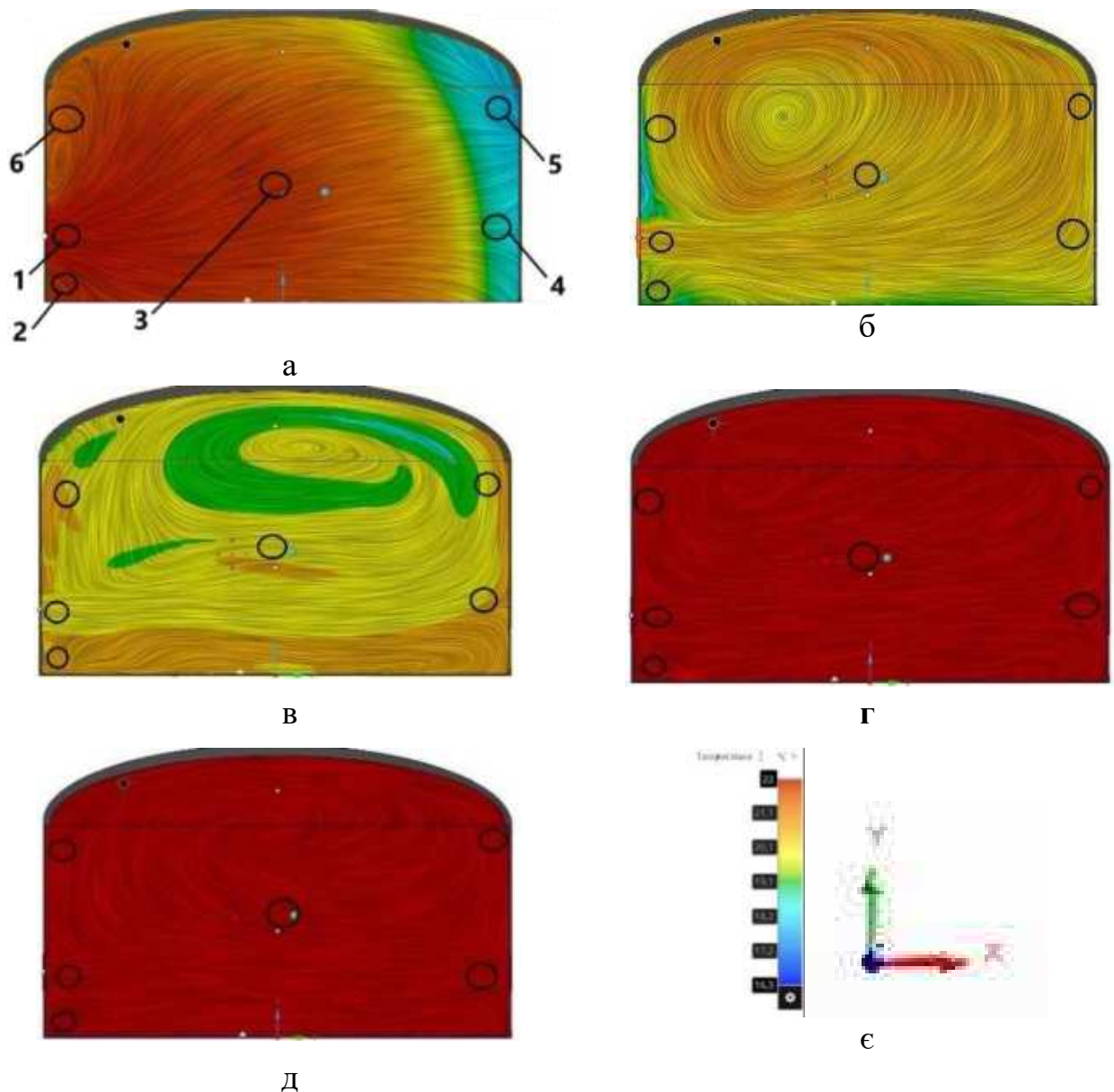


Рис. 4.4. Тестова модель температурного режиму тепличного об'єкта у різний проміжок часу: а – через 1 секунду; б – через 3 секунди; в – через 10 секунд; г – через 20 секунд; д – через 30 секунд; е – індикація зміни температури повітря, °С; 1,2,3,4,5,6 – точки контролю параметру

Вентилятор через вікно провітрювання подає у теплицю повітря з температурою 22,0 °С, при початковій температурі в теплиці - 16 °С [97].

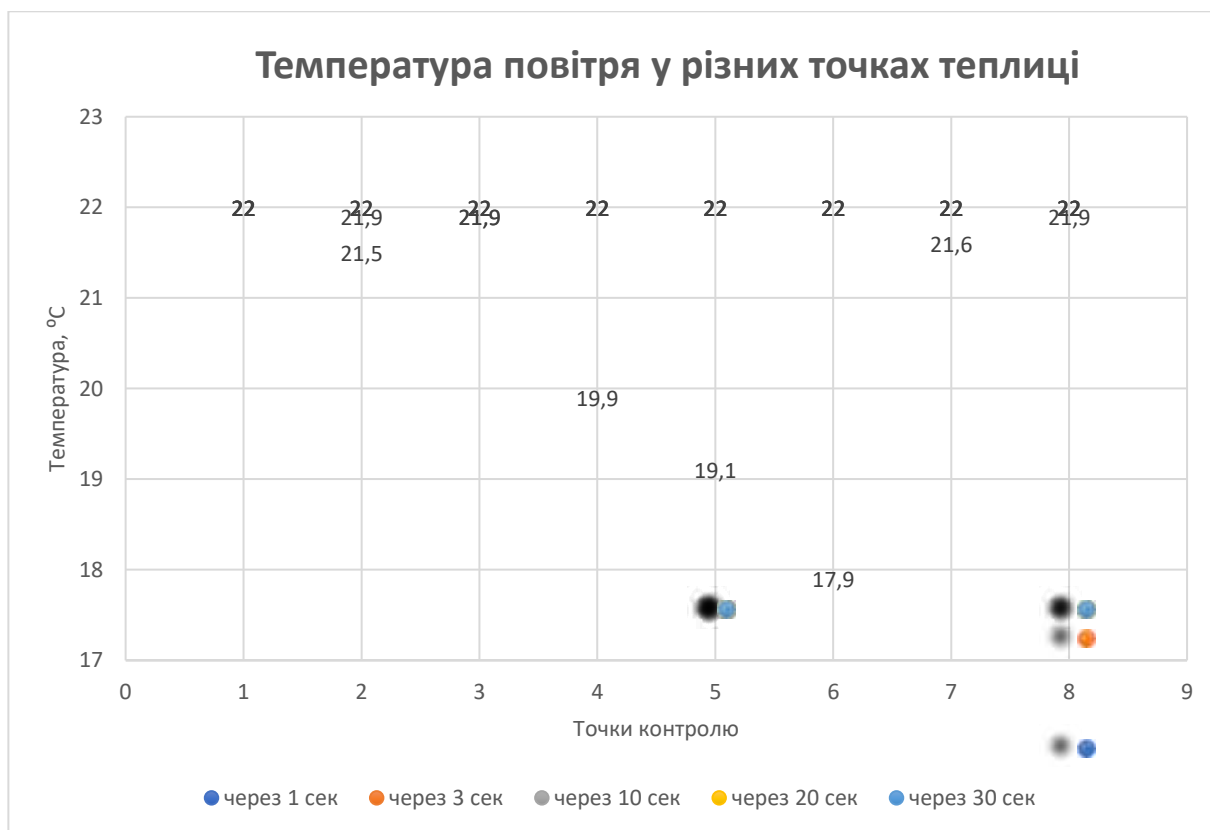
Проаналізувавши отримані епюри розподілу температурного параметру можна зробити висновок, що зміна температури у замкненому об'ємі відбувається в діапазоні від 17,9 °С до 22 °С. Локальні функції зміни параметра спостерігають у всіх точках об'єкта дослідження на 1-10 секундах. Інтегральна функція зміни параметру зображена на 20-й та 30-й секунді. На рисунку 4.5.а наведено зміни температури тепличного об'єкта в проміжок часу від 0 до 30

секунд у точках контролю. Для відслідковування та прогнозування розповсюдження температури в замкненому тепличному об'ємі встановлюються датчики температури. Місця встановлення датчиків зображено на рисунку 4.4 у кількості 6. Дана кількість датчиків дасть можливість контролювати температуру по всьому периметру теплиці та зменшить час на стабілізацію параметру.

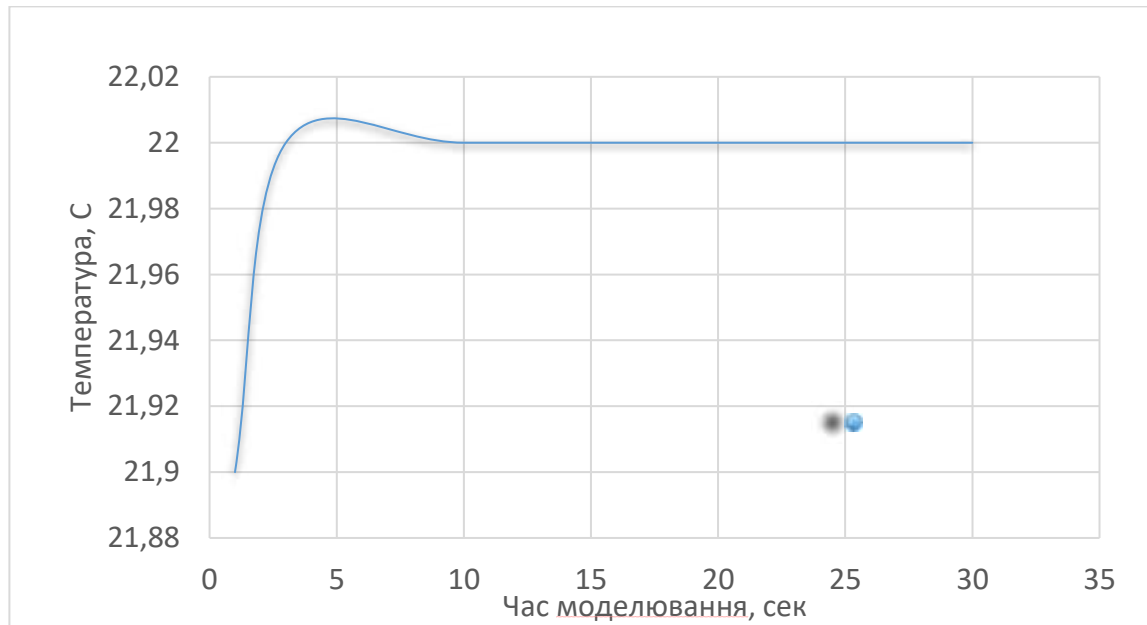
Проведено заміри температури у точках вимірювання. Результати наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Температура повітря в точках контролю

Точки заміру	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4	Дослід 5
1	22	22	22	22	22
2	21,5	21,9	22	22	22
3	21,9	21,9	22	22	22
4	19,9	22	22	22	22
5	19,1	22	22	22	22
6	17,9	22	22	22	22
Проміжок часу, сек	через 1	через 3	через 10	через 20	через 30



а

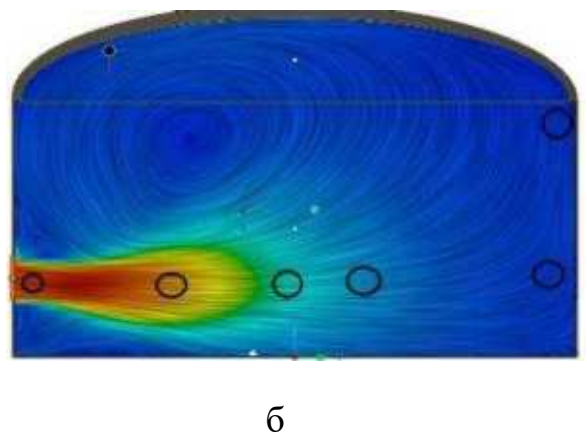
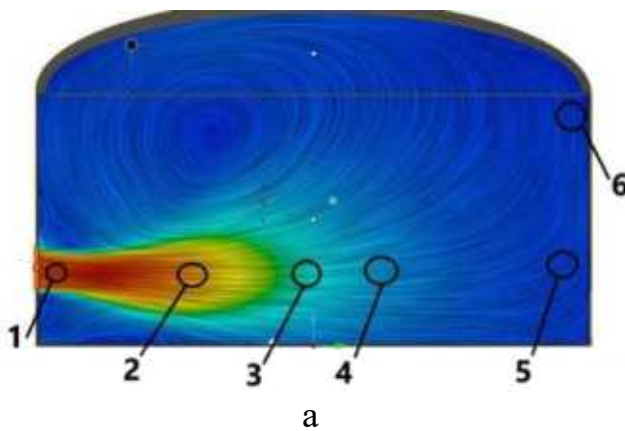


б

Рис. 4.5. Функція зміни температури повітря: а – зміна температури відносно точок заміру; б – зміна температури відносно часу моделювання

На рисунку 4.6.б зображено час стабілізації розповсюдження температури в тепличному об'єкті, який складає 10,2 секунди.

Тестова модель швидкісного режиму. Наступним дослідженням було зміна швидкості руху повітряних мас мікроклімату з часом (рис.4.6) [70]. Для цього було взято модель теплиці з попереднього дослідження та задано початкові параметри: швидкість повітря в замкнений об'єм теплиці - 0 м/с, а швидкість повітря, яке подається через вікно провітрювання – 1,1 м/с.



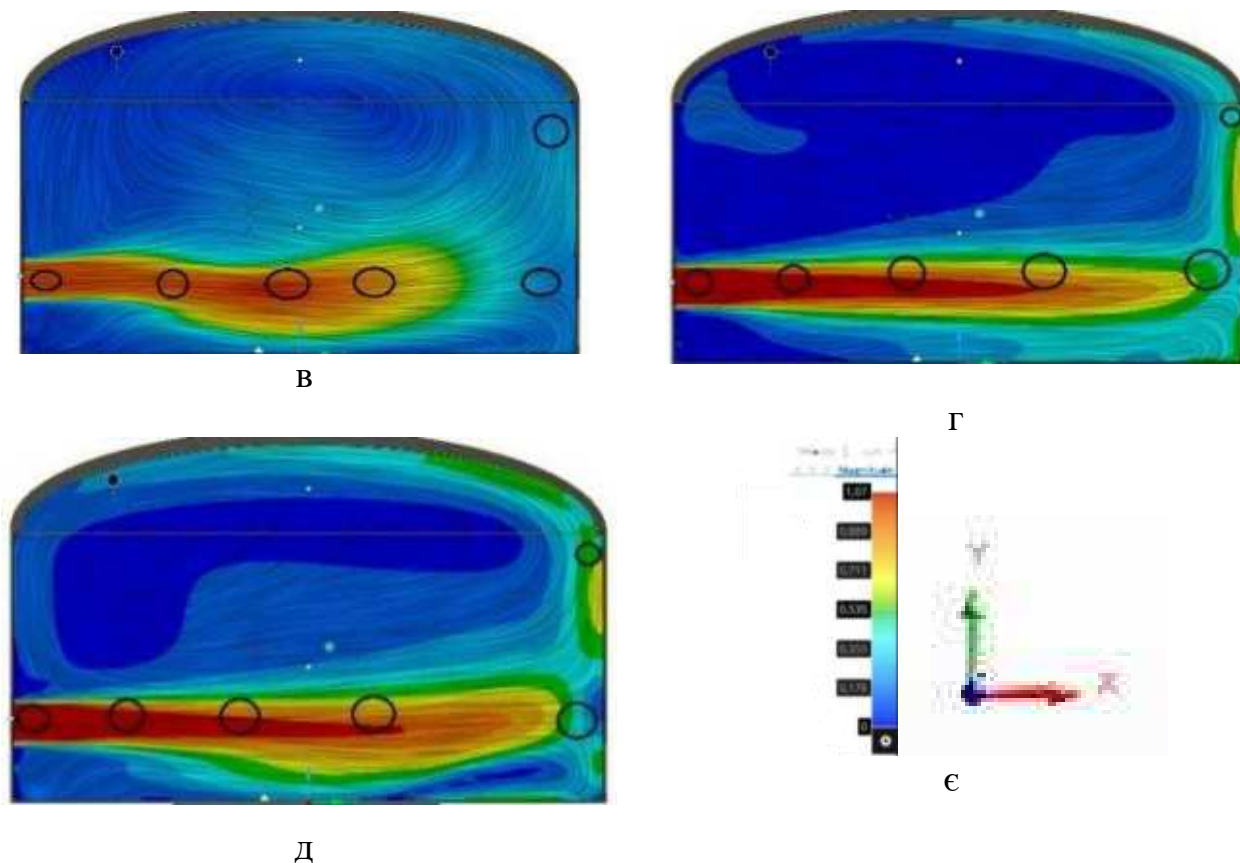


Рис. 4.6. Тестова модель швидкісного режиму тепличного об'єкта у різний проміжок часу: а – через 1 секунду; б – через 3 секунди; в – через 10 секунд; г – через 20 секунд; д – через 30 секунд; е - індикація зміни швидкості повітря, м/с; 1,2,3,4,5,6 – точки контролю параметру

Вентилятор через вікно провітрювання подає у теплицю повітря з температурою 22,0 °С, при початковій температурі в теплиці - 16 °С.

Координати точок контролю X,Y,Z: 1 точка контролю 100мм, 750мм, 600мм; 2 точка контролю 1600мм, 750мм, 600мм; 3 точка контролю 2000мм, 750мм, 600мм; 4 точка контролю 2300мм, 750мм, 600мм; 5 точка контролю 3800мм, 750мм, 600мм; 6 точка контролю 3800мм, 1300мм, 600мм.

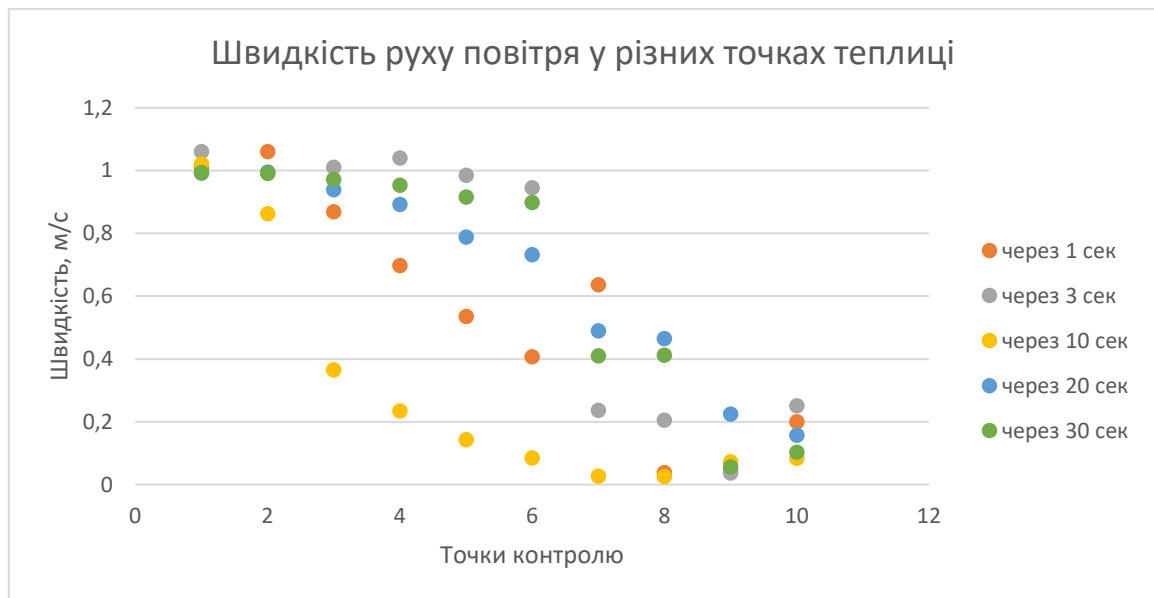
Проведено заміри швидкості розповсюдження повітря у точках вимірювання. Результати наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Швидкість розповсюдження повітря в точках контролю

Точки	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4	Дослід 5
1	1,01	1,06	1,02	0,992	0,993
2	1,06	0,992	0,862	0,995	0,991
3	0,869	1,01	0,365	0,939	0,971
4	0,697	1,04	0,234	0,892	0,953

5	0,535	0,985	0,143	0,788	0,915
6	0,407	0,945	0,0842	0,732	0,898
Проміжок часу, сек	через 1	через 3	через 10	через 20	через 30

На рисунку 4.7. наведено функцію зміни швидкості потоку повітря в тепличному об'єкті в проміжок часу від 0 до 30 секунд [103].



а



б

Рис.4.7. Функція зміни швидкості повітря: а – зміна швидкості відносно точок контролю; б – зміна швидкості відносно часу моделювання

На рисунку 4.7.а наведено зміни швидкості повітря в замкненому об'ємі тепличного об'єкта в проміжок часу від 0 до 30 секунд у точках контролю. Для

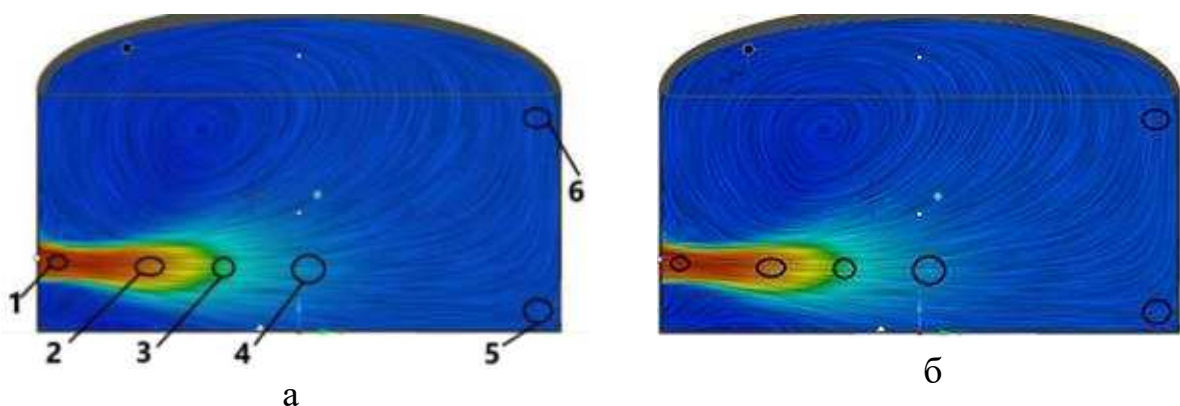
відслідковування та прогнозування розповсюдження швидкості в замкненому тепличному об'ємі встановлюються датчики швидкості. Місця встановлення датчиків зображено на рисунку 4.6.а у кількості 6. Локальні функції зміни параметра спостерігають у всіх точках об'єкта дослідження, які знаходяться в одній площині з входними вікнами провітрювання. Інтегральна функція зміни параметру зображена з 1 по 10 секунду.

Вплив швидкісного параметру: зміна швидкості у замкненому об'ємі відбувається в діапазоні від 0,025 м/с до 1,06 м/с. Час стабілізації швидкості – коливальний процес 60 сек не затихає, амплітуда 0,05 м/сек.

На рисунку 4.7.6 наведено зміни швидкості руху повітряних мас тепличного об'єкта в різний проміжок часу. Спостерігаємо коливальний процес який 60 секунд не затихає, амплітуда 0,05 м/сек.

Тестова модель зміни тиску. Третім тестовим випробуванням було дослідження функції зміни тиску повітря відносно часу (рис.4.8). Для цього було взято модель теплиці з попереднього дослідження та задано початкові параметри: швидкість повітря в замкнений об'єм теплиці - 0 м/с, а швидкість повітря, яке подається через вікно провітрювання – 1,1 м/с. Вентилятор через вікно провітрювання подає у теплицю повітря з температурою 22,0 °С та тиском 300 Па, при початковій температурі в теплиці - 16 °С.

Координати точок контролю X,Y,Z: 1 точка контролю 100мм, 750мм, 600мм; 2 точка контролю 1200мм, 750мм, 600мм; 3 точка контролю 1600мм, 750мм, 600мм; 4 точка контролю 2000мм, 750мм, 600мм; 5 точка контролю 3800мм, 100мм, 600мм; 6 точка контролю 3800мм, 1300мм, 600мм.



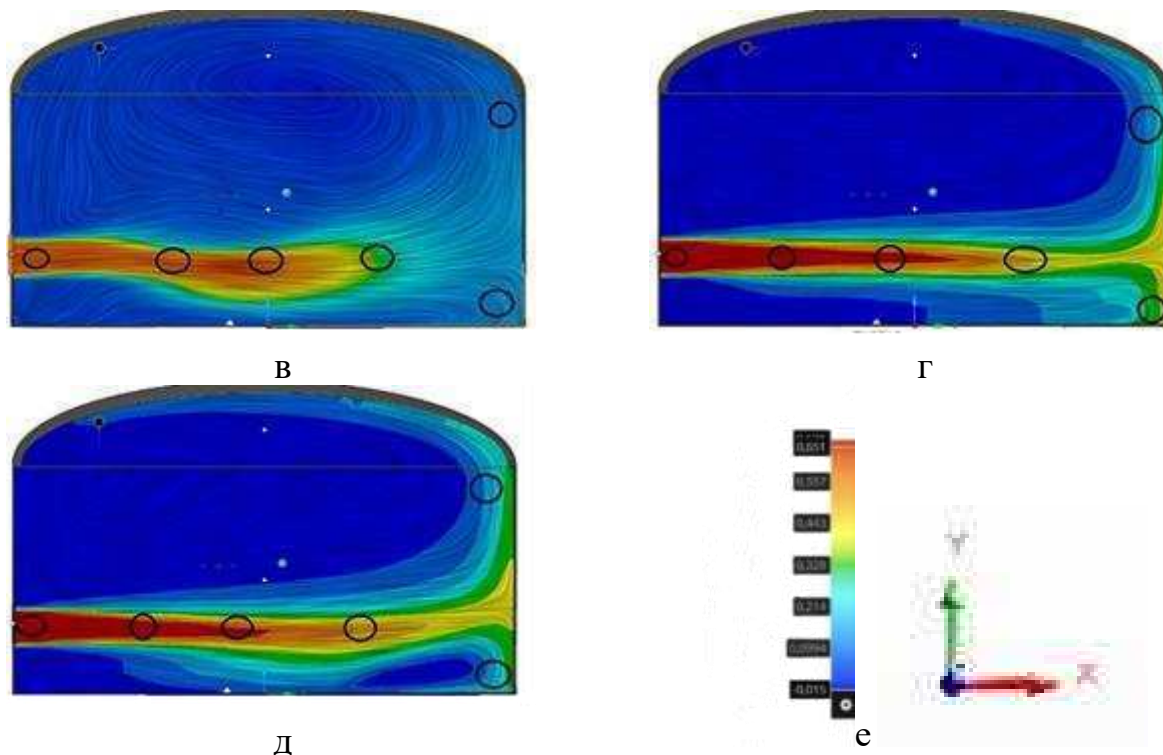


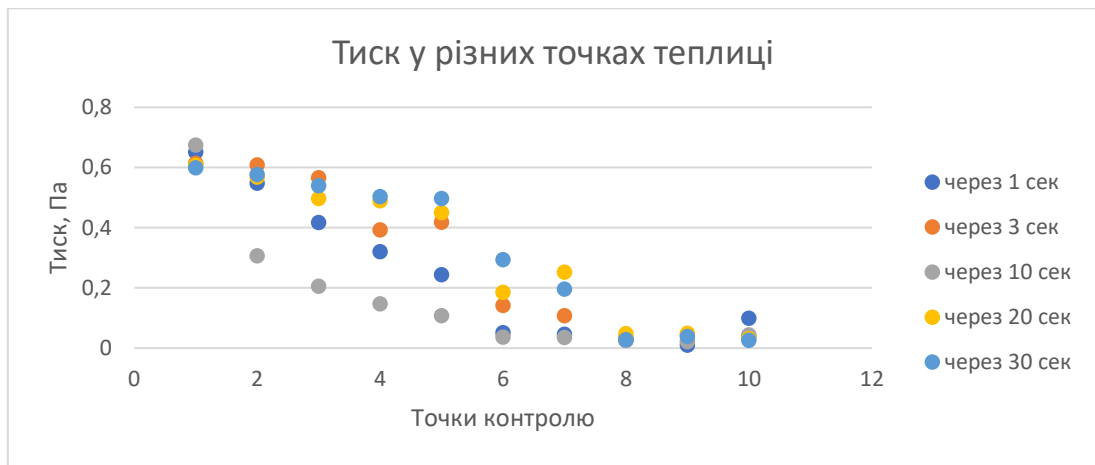
Рис. 4.8. Тестова модель зміни тиску тепличного об'єкта у різний проміжок часу: а – через 1 секунду; б – через 3 секунди; в – через 10 секунд; г – через 20 секунд; д – через 30 секунд; е - індикація зміни тиску повітря, Па; 1,2,3,4,5,6 – точки контролю параметру

Проведено заміри тиску повітря у точках контролю. Результати наведені у таблиці 4.3.

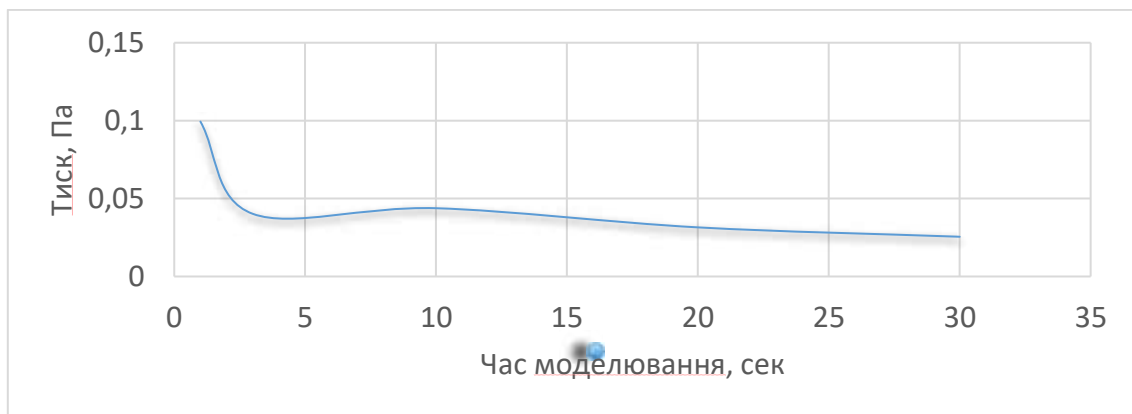
Таблиця 4.3. Тиск повітря в точках контролю

Точки	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4	Дослід 5
1	0,651	0,614	0,675	0,608	0,599
2	0,548	0,609	0,307	0,568	0,577
3	0,417	0,566	0,206	0,497	0,54
4	0,321	0,393	0,147	0,49	0,504
5	0,244	0,418	0,108	0,45	0,497
6	0,0514	0,142	0,0369	0,186	0,294
7	0,0465	0,108	0,0359	0,253	0,196
Проміжок часу	через 1	через 3	через 10	через 20	через 30

На рисунку 4.9 наведено зміни тиску повітря в замкненому об'ємі тепличного об'єкта в проміжок часу від 0 до 30 секунд у точках контролю. Час стабілізації тиску складає більше 50 сек [103].



а



б

Рис.4.9. Функція зміни тиску повітря відносно часу моделювання: а – зміна тиску відносно точок контролю; б – зміна тиску відносно часу моделювання

Таким чином, побудована тестова модель показує, що приток повітря в нижній частині об'єкта через вхідне вікно повітря всередину викликає більшу швидкість руху повітряних мас всередині теплиці. Аналіз швидкісного режиму розподілу мікроклімату показує, що більше вихрові потоки повітря генерується всередині теплиці, в основному сконцентровані у верхній частині об'єкта, що перешкоджає циркуляції повітряного потоку по всьому замкненому об'єму.

Розподіл температурного та швидкісного параметрів показує, що більше вихрові потоки повітря генеруються всередині теплиці, вони зазвичай сконцентровані у верхній частині об'єкта, що перешкоджає циркуляції повітряного потоку по всьому замкненому об'єму.

4.3. Дослідження теплової потужності теплиці

Для обігріву тепличного об'єкта доцільно використовувати електричний нагрівач. Для його підбору було визначено теплову потужність для заданого об'єму теплиці. Теплову потужність калорифера визначаємо за формулою:

$$Q_k = C_{\text{теп}} * G_{\text{вип}} (T_{\text{кін}} - T_{\text{поч}}), \text{ кВт} \quad (4-1)$$

t_{np}, t_n – температура повітря на вході та виході з калорифера.

$$Q_k = 1,005 * 2392,05 * 3600 * (18 - 10) = 5,367 \text{ кВт}$$

Отже, з розрахунків бачимо, що для того щоб нагріти теплицю об'ємом 1400 м³ з температурою навколишнього повітряного потікища 10 °С до 18 °С необхідно встановити калорифер на 5,5 кВт.

День	Час	Висота км	Дальн. видим.	Хмарн.	Вітер	Швидк. Вітру	Темп. пов.	Точка роси	Тиск станц.	Тиск моря	Опаді	Час	Явища погоди	Темп. макс	Темп. мін	Висота хмар
26	3:00		8	↓	1 м/с	15.6°	-5						ясно	80%	+15.6°	
26	8:00		8	↻	0 м/с	14.2°	-5						ясно	80%	+14.2°	
26	9:00		8	↻	1 м/с	15.9°	-5						зливовий дощ слабкий	80%	+15.9°	
26	12:00		8	↻	1 м/с	20.3°	-5						небо без хмар	80%	+20.3°	
26	15:00		8	↻	3 м/с	18.7°	-5						приморозькі опаді на станції або в лінійній зоні	81%	+18.7°	
26	18:00		8	↻	1 м/с	18.7°	-5						небо без хмар	81%	+18.7°	
26	21:00		8	↻	0 м/с	18.6°	-5						небо без хмар	87%	+18.6°	
27	0:00		8	↻	0 м/с	14.2°	-5						ясно	87%	+14.2°	

ХМАРИ хмарні - купчасті-доливі з нахвильною, середні - хмарі середнього ярусу неопалиті через температуру чи заповнення, високі - високі хмарні неопалиті через температуру чи заповнення

Рис.4.10. Прогноз погоди [72]

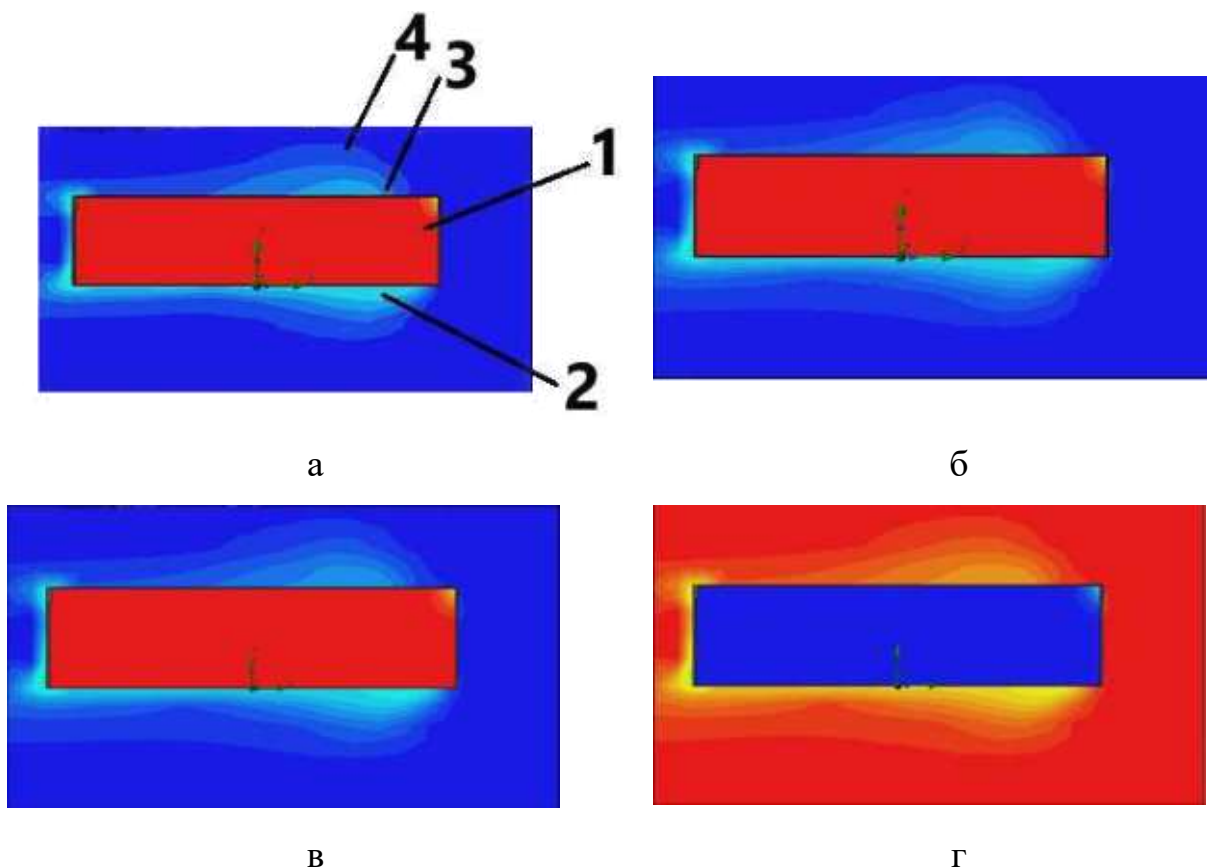
Для безперервної роботи теплиці у будь-яку пору року розглянемо зміну температури за добу[58].

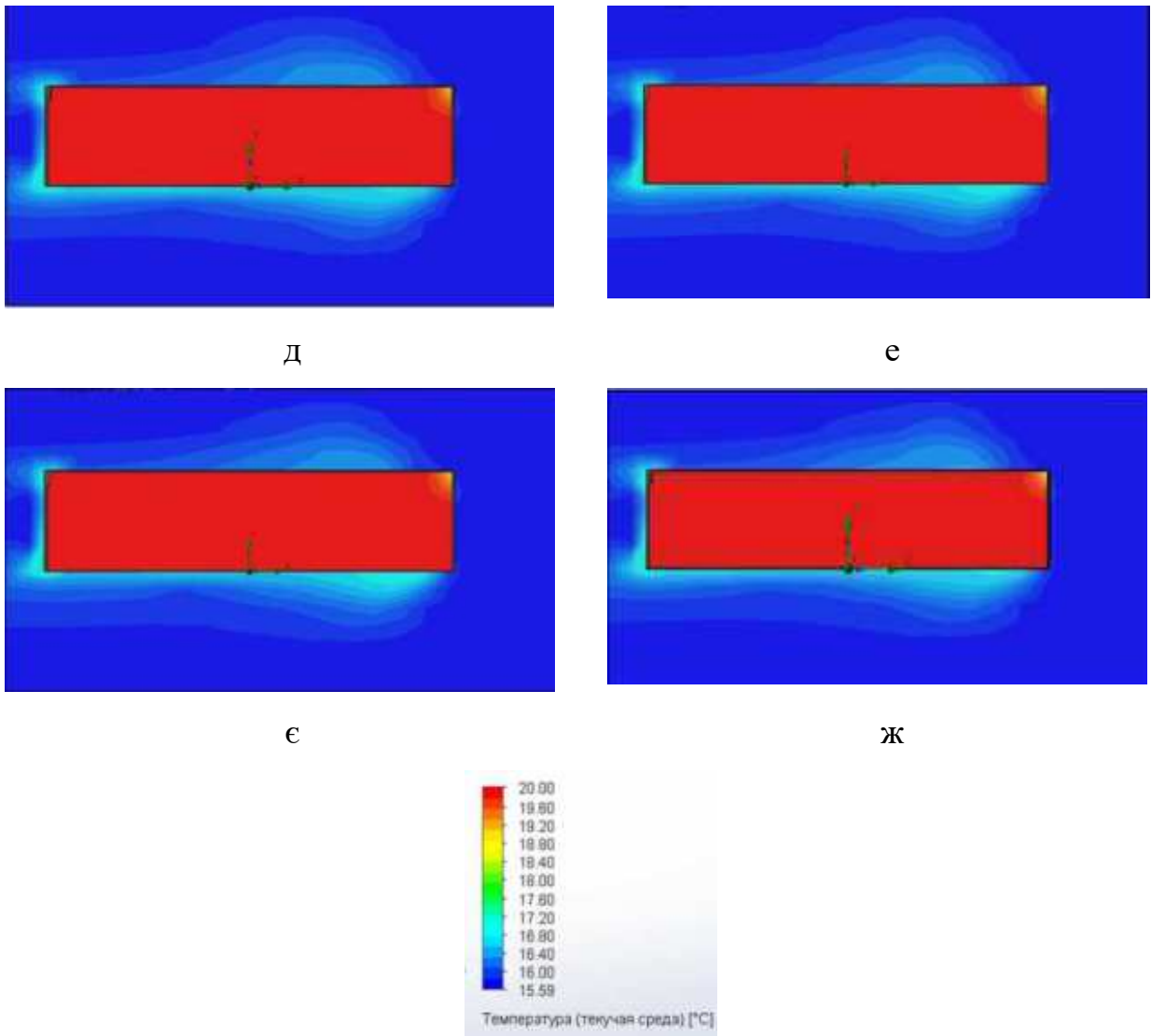
Проаналізувавши прогноз погоди та провівши розрахунки необхідної потужності для калорифера отримані результати занесені до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Результати розрахунку теплової потужності теплиці
впродовж доби

Час, год	Темп., °C	Теплоємність повітря, кДж/кг*°C	Масова витрата повітря, кг/с	Темп. повітря на вході, °C	Темп. в середині теплиці, °C	Теплову потужність, кВт
03.00	15,6	1,005	2392,05	15,6	20	10,58
06.00	14,2	1,005	2392,05	14,2	20	13,94
09.00	16,9	1,005	2392,05	16,9	20	7,45
12.00	20,3	1,005	2392,05	20,3	20	-0,72
15.00	16,7	1,005	2392,05	16,7	20	7,93
18.00	18,7	1,005	2392,05	18,7	20	3,13
21.00	16,6	1,005	2392,05	16,6	20	8,17
00.00	14,2	1,005	2392,05	14,2	20	13,94

Для перевірки правильності розрахунків та наглядності було проведено моделювання процесу теплопередачі через стінки теплиці (рис.4.11) відповідно до прогнозу погоди (рис.4.10). На рисунку 4.11а позначено зону нагрітого тепличного об'єкта (1), процес теплопередачі між накриттям і внутрішнім повітрям теплиці (2), конвективний теплообмін (3,4), фізика процесу теплообміну було обґрунтовано в розділі 3 [65,69,80].

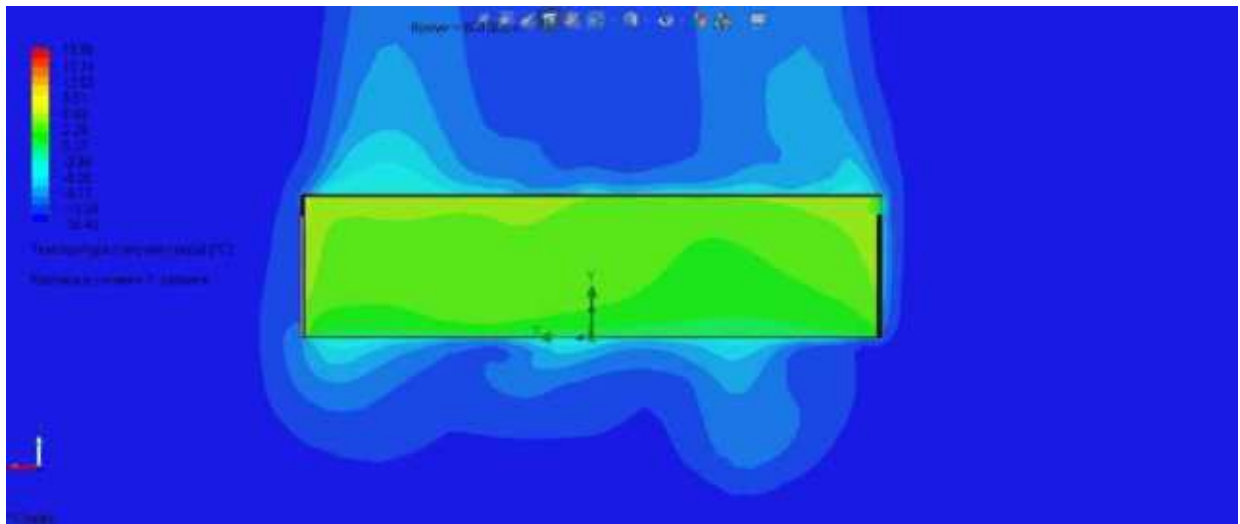




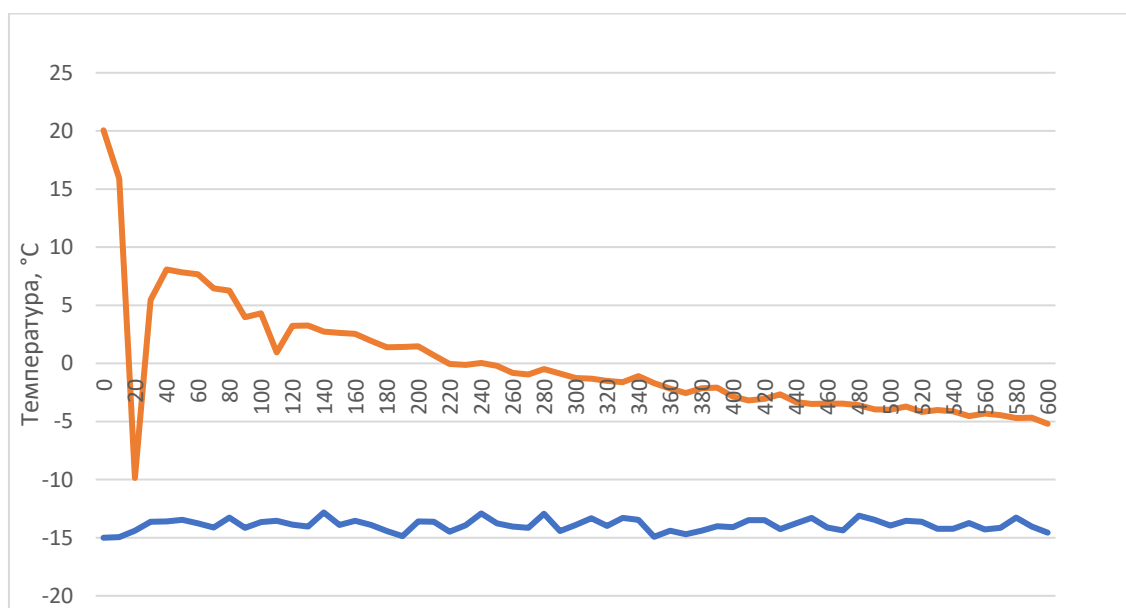
з

Рис. 4.11. Тестова модель зміни теплової потужності у тепличному об'єкті відповідно до прогнозу погоди: а – при «15,6°C»; б – при «14,2°C»; в - при «16,9°C»; г – при «20,3°C»; д – при «16,7°C»; е - при «18,7°C»; є - при «16,6°C»; ж - при «14,2°C»; з - індикація зміни температури зовнішнього повітряного середовища, °C

З отриманих епюр виділення тепла від тепличного об'єкта можна зробити висновок, що додатковий обігрів теплиці потрібен постійно, окрім періоду ≈ 12 годині дня, так як температура зовнішнього повітря сягає 20,3 °C, в цей час відбувається акумуляція теплової енергії. При таких параметрах зовнішнього повітряного середовища для підтримування сталого мікроклімату у теплиці має включитися режим провітрювання [65].



а

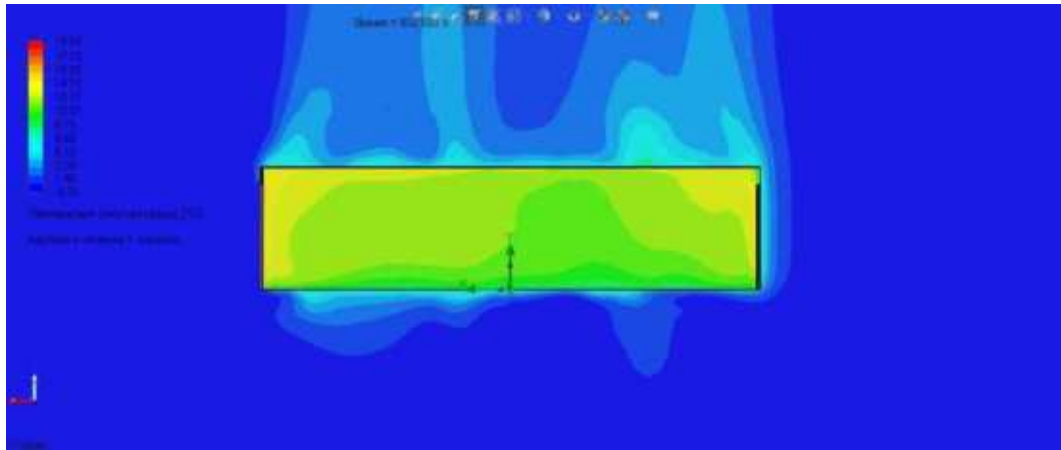


б

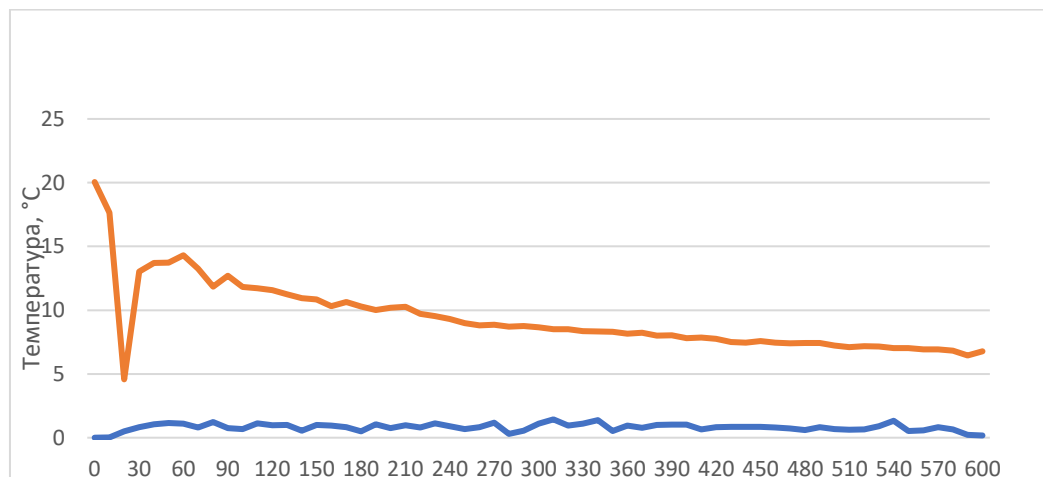
Рис.4.12. Стабілізація температури теплиці при зовнішній температурі " -15°C ": а – епюра розподілу теплової потужності теплиці; б – графік залежності зміни теплової потужності теплиці при сталому значенні зовнішньої температури в часі

Розглянемо теплицю при умові, що спочатку повітря всередині було нагріто до 20°C , а потім обігрів було вимкнено. Так при зовнішній температурі повітря « -15°C » час стабілізації температури приблизно сягає 2 хвилини, а потім температура поступово знижується. На епюрі температур спостерігаємо швидкий теплообмін з навколишнім повітряним середовищем (рис.4.12а). Середнє значення температури в середині теплиці при цьому складає « $2,5^{\circ}\text{C}$ » (рис.4.12б). При зовнішній температурі повітря 0°C час стабілізації приблизно

сягає 1 хвилину, а потім температура поступово знижується. На епюрі температур спостерігаємо помірний теплообмін з навколишнім повітряним середовищем (рис.4.13а). Середнє значення температури в середині теплиці при цьому складає 7°C.



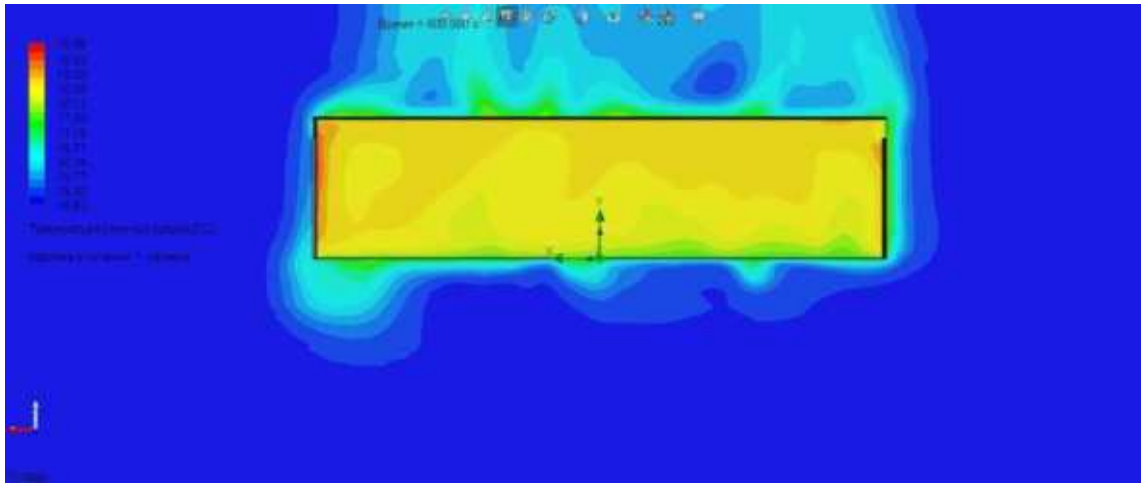
а



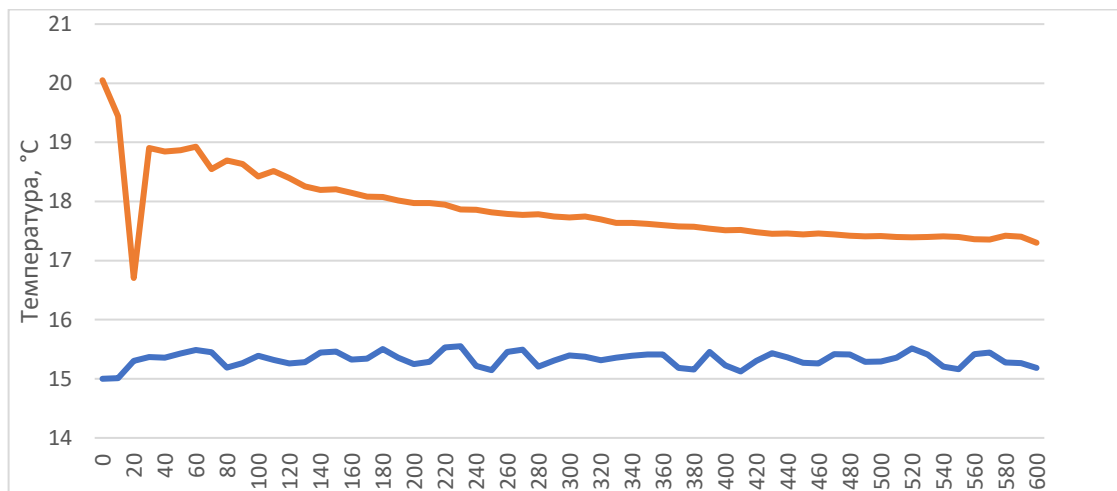
б

Рис.4.13. Стабілізація температури теплиці при зовнішній температурі "0 °C": а – епюра розподілу теплової потужності; б – графік залежності зміни теплової потужності теплиці при сталому значенні зовнішньої температури в часі

При зовнішній температурі повітря 15°C час стабілізації приблизно сягає 20 секунд, а потім температура поступово знижується ще 80 секунд (рис.4.14б) і середнє значення температури в середині теплиці при цьому складає 18°C. На епюрі температур спостерігаємо повільний теплообмін з навколишнім повітряним середовищем (рис.4.14а) [65].



а



б

Рис.4.14. Стабілізація температури теплиці при зовнішній температурі "15 °С": а – епюра розподілу теплової потужності теплиці; б – графік залежності зміни теплової потужності теплиці при сталому значенні зовнішньої температури в часі

За формулою 3-3 було визначено теплові втрати теплиці через огорожувальну конструкцію з полікарбонату (табл.4.5). Тепличний об'єкт нагріли до 20 °С, після чого обігрів було вимкнено. Габаритні розміри прийнято 7000x4000x1600 мм, коефіцієнт теплопровідності полікарбонату прийнято 3,6 Вт/м²*°С.

Таблиця 4.5. Результати розрахунку теплових втрат теплиці через огорожувальну конструкцію

Параметри/год	03.00	06.00	09.00	12.00	15.00	18.00	21.00	00.00
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Температура зовн.серед., °С	15,60	14,20	16,90	20,30	16,70	18,70	16,60	14,20
Температура в середині теплиці, °С	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Різниця температур, °С	4,40	5,80	3,10	-0,30	3,30	1,30	3,40	5,80
Коеф. теплопровідності, Вт/м ² *°С	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Заг.площа огор. Констр., м ²	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5
Втрата тепла через стінки, Вт	720,7	950,04	507,78	-49,1	540,5	212,9	556,92	950,04

З отриманих епюр виділення тепла від тепличного об'єкта та часу стабілізації температури повітря в середині теплиці при різних температурах зовнішнього повітряного середовища можна зробити висновок, що час стабілізації температури в середині теплиці зменшується при збільшенні температури повітря навколишнього повітряного та рідинного середовища. Максимальну кількість тепла теплиця втрачає о 6 годині ранку та о півночі і складає 950 Вт. Мінімальну кількість тепла теплиця втрачає о 12 годині дня, коли температура зовнішнього повітря досягає піку відповідно до прогнозу погоди. Проведені розрахунки свідчать про те, що у 12 годині для тепличний об'єкт накопичує теплову потужність через огорожувальну конструкцію, в результаті чого закумуляовано 49 Вт тепла.

4.4. Дослідження втрати теплової потужності теплиці через огорожувальну конструкцію

Зробимо аналіз змін поля температури в об'ємі теплиці та визначимо втрати теплової потужності в часі [65,79]. Для цього було взято модель теплиці з попереднього дослідження та задано наступні початкові дані:

1 – початкове значення температури повітря всередині замкнутого об'єму об'єкта дослідження;

2 – початкові значення температури зовнішнього повітряного середовища.

Повітрообмін тепличного об'єкта – 1400 м³/год; початкове значення температури повітря в середині теплиці 20 °С; температура потоку повітря, що обтікає теплицю становить від «-15 °С» до «+15 °С» [104].

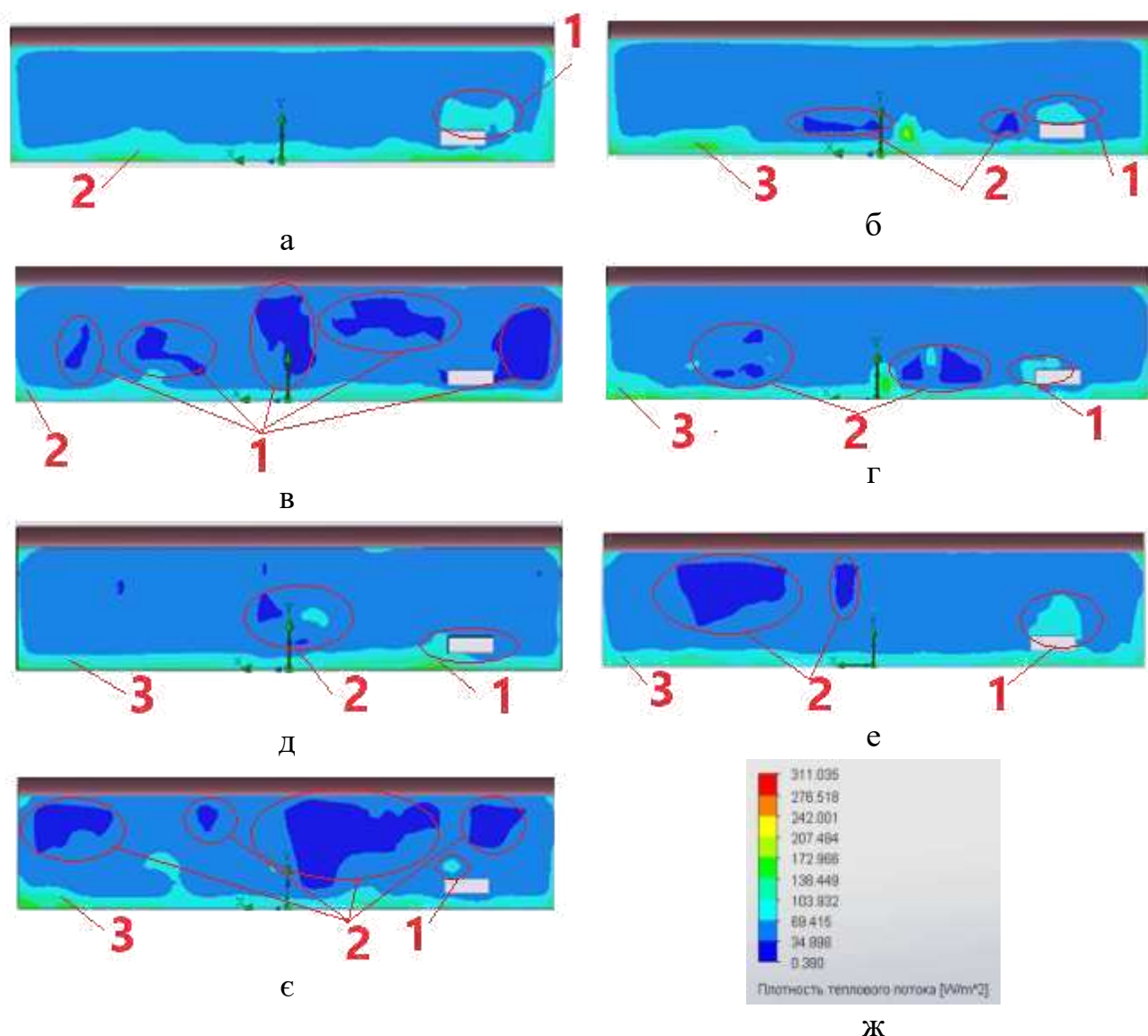


Рис. 4.15. Результати моделювання зміни втрати теплової потужності теплиці при охолодженні: а – при «-15°С»; б – при «-10°С»; в - при «-5°С»; г – при «0°С»; д – при «5°С»; е - при «10°С»; е - при «15°С»; ж – розмірність густини теплового потоку

За результатами експерименту отримано розподіл густини теплової потужності теплиці під час охолодження під впливом сталих значень температури зовнішнього повітряного середовища від «-15°С» до «+15°С» (рис. 4.15). Початкова втрата теплової потужності в об'єкті прийнята – 0 кВт, початкова температура в середині теплиці «+20°С». Припустимо, що у

тепличному об'єкті попереднім нагрівом створено температурний режим «+20°C», після чого нагрівач було вимкнено. Далі була змодельована зміна температури повітря в неопалювальній теплиці із різними значеннями температури зовнішнього повітря [84,89].

Оскільки теплообмін з навколишнім повітряним та рідинним середовищем є нестабільним, для визначення усередненого значення теплової потужності термін моделювання складав від 20 хвилин до 3 годин. За попередніми експериментами час стабілізації епюр швидкостей в теплиці не перевищує 2... 5 хвилин, тобто час моделювання має забезпечувати стабілізацію теплообмінних процесів за час експерименту. Перший експеримент з різницею температур 35°C показав майже однакову щільність теплового потоку по поверхні теплиці (рис. 4.15а). Спостерігається максимальне теплове випромінювання по периметру теплиці (2) та біля вікна провітрювання (1), мінімальне значення щільності теплового потоку спостерігаємо в незначній кількості в центральній частині теплиці (3). Усереднена щільність теплового потоку становить 138 Вт/м². Щільність теплового випромінювання поступово зменшується при підвищенні температури повітряного та рідинного середовища (рис. 4.15б – 4.15є). Це засвідчують як зони меншої густини теплового потоку, так і загальне зниження розрахованої потужності. Так при різниці температур 10°C найбільша потужність припадає на нижню частину поверхні і густина складає -103 Вт/м². Для всіх експериментів найбільша густина потужності теплового потоку (світлий прошарок) має місце на нижньому краї поверхні стінок, що викликано конвективними потоками зовнішнього повітря (рис. 4.15). Тобто максимальна різниця температур по обидві сторони теплиці має місце тільки біля ґрунту. Далі, по висоті стінок, підіймається повітря, що пройшло вплив теплового випромінювання теплиці. Різниця температур по обидві боки поверхні зменшується по вертикалі вздовж стінок. Внутрішні конвективні потоки призводять до локальних зон зменшеної різниці температур, що відображають темні зони розподілу густини теплового потоку. За результатами модельних досліджень, проведених для добових змін температури оточуючого повітряного

та рідинного середовища (рис. 4.15), розраховано середнє значення втрати теплової потужності теплиці впродовж доби, яке наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Втрата теплової потужності теплиці впродовж доби

Години доби	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00	18.00	21.00	00.00
Темп. зовн. серед.	15,6	14,2	16,9	20,3	16,7	18,7	16,6	14,2
Втрата теп. потуж.	0,416	0,430	0,289	-	0,309	0,12	0,318	0,4303

Розраховано дефіциту теплової потужності для всього об'єму теплиці:

$$Q = \Delta t * N * V,$$

де:

Δt – різниця температури зовнішнього та внутрішнього повітря, °C;

N - втрата теплової потужності теплиці впродовж доби, Вт/м².

Отже максимальний дефіцит теплової потужності буде складати:

$$Q = (20 - 14,2) * 0,43 * 1400 = 3,5 \text{ кВт}$$

За отриманими значеннями середньої втрати теплової потужності теплиці та об'ємною витратою для вентиляції теплиці побудований графік зміни теплової потужності впродовж доби (рис. 4.16).

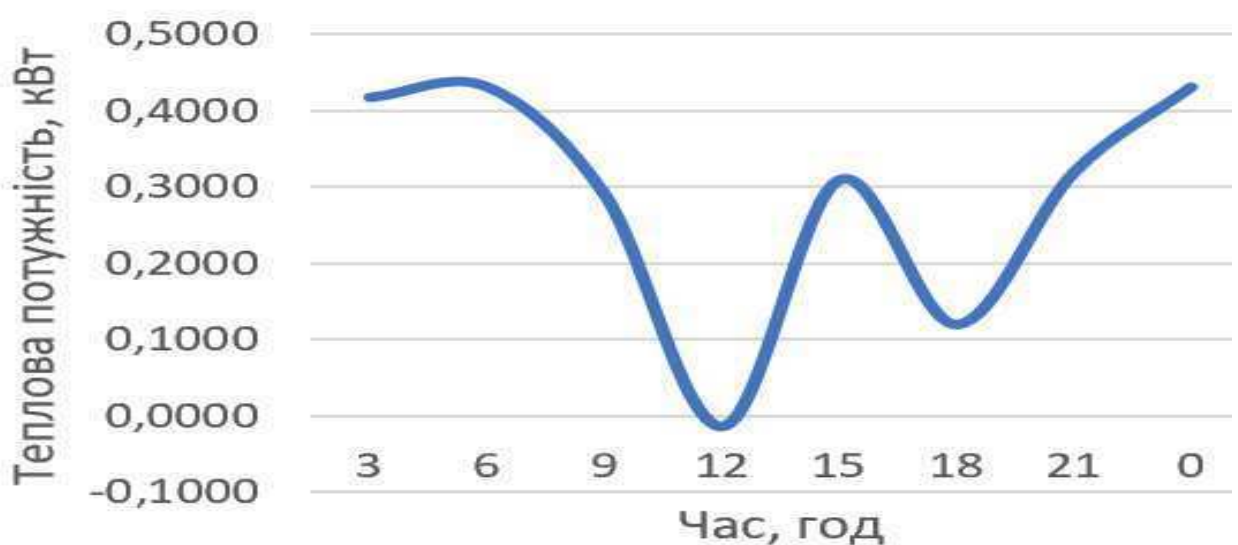


Рис. 4.16. Зміна теплової потужності теплиці

Дане дослідження дало можливість відслідкувати втрату теплової потужності теплиці впродовж доби, що дало підґрунтям для визначення потужності калориферів та режиму їх роботи.

4.5. Дослідження втрати вологості повітря в середині теплиці

Для модельного дослідження вирішено прийняти вхідною змінною вологість повітря зовнішнього рідинного середовища. В моделі тепличного об'єкта забезпечується регулювання різниці водяної пари за допомогою форсунок. Для цього експерименту було взято модель теплиці з попереднього дослідження та задано наступні початкові дані: повітрообмін тепличного об'єкта – 1400 м³/год; початкове значення температури повітря в середині теплиці 20 °С; початкове значення вологості повітря в середині теплиці 70 %; температура потоку повітря, що обтікає теплицю, становить від 13,9 °С до 26,2 °С відповідно до прогнозу. Вказані початкові значення температури і вологості дорівнюють стабілізованим значенням цих параметрів.

Для проведення випробування моделі було сформовано масив даних відповідно до задачі та основних параметрів об'єкта дослідження. Введено наступні початкові дані [64]:

1 – початкове значення температури повітря всередині замкненого об'єму теплиці 20°С;

2 – початкове значення вологості повітря всередині замкненого об'єму теплиці 70 %;

3 – термін очікування стабілізації теплообмінних процесів від 20 хвилин до 3 годин.

За результатами експерименту отримано епюри розподілу водяної пари в об'ємі теплиці під впливом зміни температури припливного повітря впродовж доби від «+13,9°С» до «+26,2°С». Розрахована початкова щільність водяної пари в об'єкті дослідження становить 12,11 г/м³, початкова температура в середині теплиці «+20°С». Припущено, що у тепличному об'єкті попереднім зволоженням

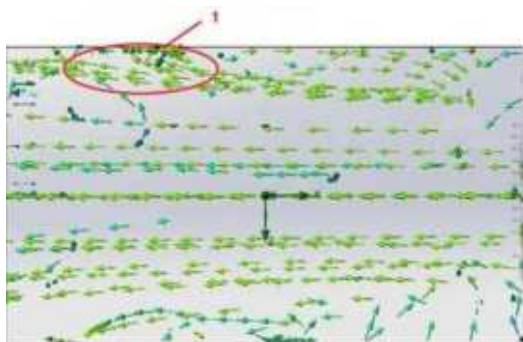
встановлено «70%» вологості повітря, після чого систему туманоутворення було вимкнено.

Далі була змодельована зміна розподілу водяної пари теплиці під діє переносу повітряних мас в середині об'єму теплиці із різними значеннями температури припливного повітря. Кожні три години відбувалось сканування епюр розподілення вологи і проводився аналіз характерних змін (рис. 4.17) [76].

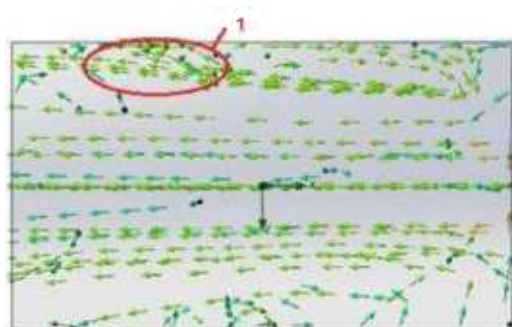
Початковий стан розподілу водяної пари о 00.00: вологість 68% при температурі вхідного повітря 15,6 °С засвідчує майже однакову щільність водяної пари в об'ємі теплиці (рис. 4.17а). Спостерігається накопичення водяної пари біля вікна провітрювання (зона 1), що свідчить про утворення точки роси через зниження температури на стінках теплиці (рис. 4.17а).

Стан розподілу водяної пари о 03.00: вологість повітря 72 % при температурі вхідного повітря 15,7 °С вказує на незначне збільшення кількості вологи на вході в теплицю та накопичення водяної пари біля вікна провітрювання (рис. 4.17б, зона 1). Площа зони накопичення водяної пари майже не змінилась за 3 години.

Стан розподілу водяної пари о 06.00: в середньому маємо 82 % вологості при температурі вхідного повітря 13,9 °С. Епюра вказує на суттєве збільшення кількості вологи на вході в теплицю, що засвідчує виникнення зони 2. Також



а (00.00-03.00)



б (03.00-06.00)

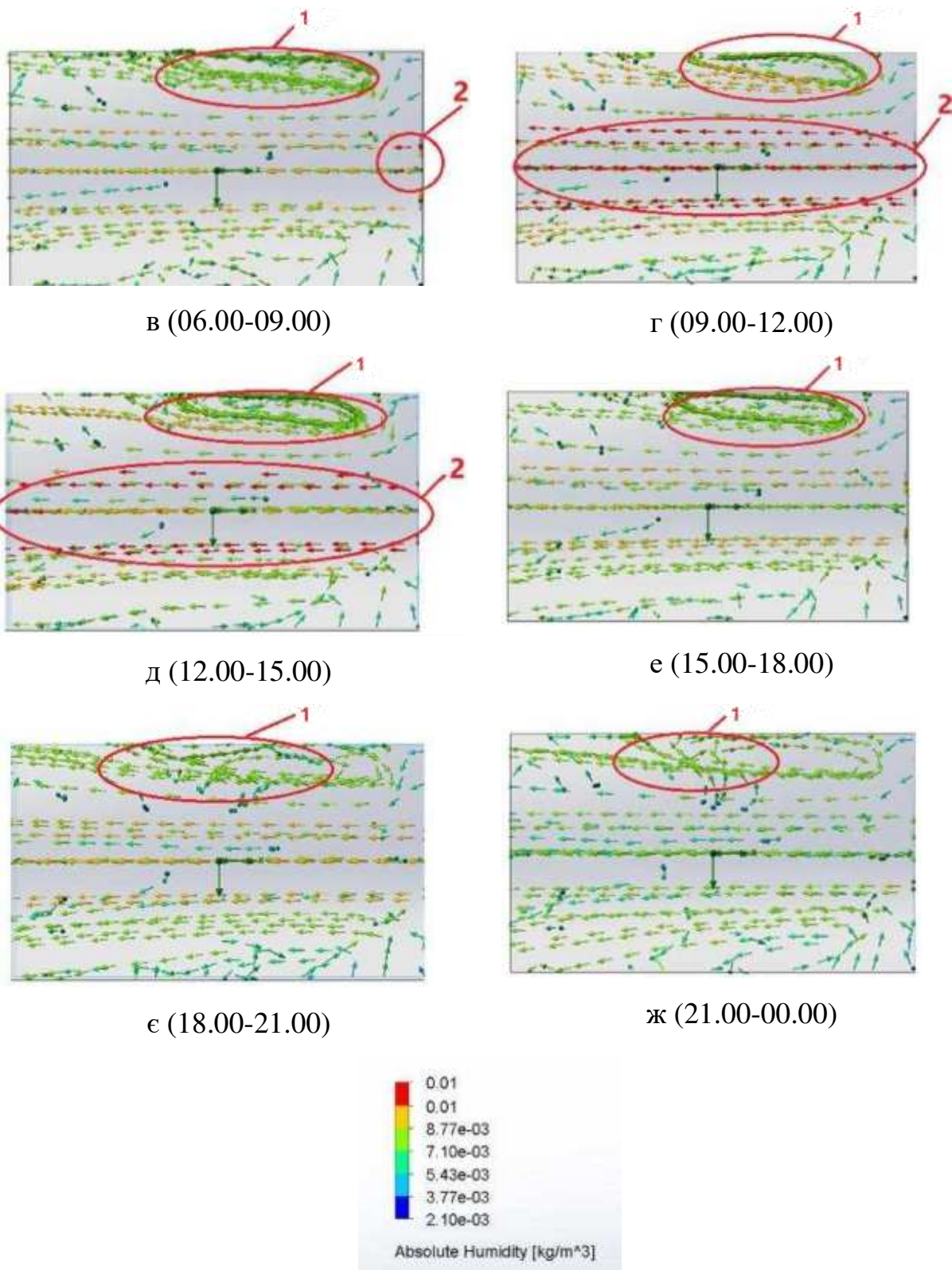


Рис. 4.17. Епюра змін розподілу вологості повітря в перерізі теплиці впродовж доби: а – 68 % при температурі вхідного повітря 15,6 °С; б – 72 % при температурі вхідного повітря 15,7 °С; в - 82 % при температурі вхідного повітря 13,9 °С; г – 62% при температурі вхідного повітря 20,7 °С; д – 42% при температурі вхідного повітря 25,4 °С; е – 41 % при температурі вхідного повітря 26,2 °С; є - 45% при температурі вхідного повітря 23,9 °С; ж – 67% при температурі вхідного повітря 16,1 °С; з - індикація кількості водяної пари в 1м³

продовжується накопичення водяної пари біля вікна провітрювання і зростання площі зони 1 майже в 3 рази (рис. 4.17в).

Таким чином, якщо за перші 3 години відбулося підвищення вологості на 4%, то додавання ще 3 годин збільшило вологість на 10%. Можна припустити, що зміна вологості у часі має накопичувальний зміст і відповідна залежність матиме суттєво нелінійний характер. Хоча у порівнянні з двома першими інтервалами відбулось зниження температури вхідного повітря майже на 2 градуси, що також дало збільшення вологості.

Стан розподілу водяної пари о 09.00: усереднена вологість 62% при суттєвому підвищенні температури вхідного повітря 20,7 °С. Епюра розподілу зберігає максимальну концентрацію водяної пари у верхній частині теплиці при частковому розширенні зони 1 (приблизно на 20%). При цьому центральна зона (зона 2) збільшилася в декілька разів і досягла протилежної стінки теплиці (рис.4.17г).

Стан розподілу водяної пари о 12.00: в середньому маємо 42% вологості при підвищенні температури вхідного повітря до 25,4 °С. Розподіл вказує на суттєве (більше за 20%) зниження концентрації водяної пари у верхній частині тепличного об'єкта та біля вікна провітрювання у порівнянні з попереднім дослідженням (рис. 4.17д). Можна припустити, що різке зниження показника викликано як температурним фактором, так і пониженням доданої вологості вхідним потоком зовнішнього повітря. Згідно з прогнозом погоди, вологість зовнішнього повітря 42% при підвищеній, по відношенню до теплиці, температурі.

Стан розподілу водяної пари о 15.00: в середньому маємо 41% вологості при майже незмінній температурі вхідного повітря до 26,2 °С. Оскільки середнє значення вологості майже незмінне, а площа зон підвищеної вологості 1 і 2 суттєво зменшена то можна припустити, що теплообмінні процеси в теплиці мали стабілізаційний характер, а час стабілізації є співрозмірним з інтервалом досліджень, тобто з 3 годинами (рис. 4.17е).

Стан розподілу водяної пари о 18.00: в середньому маємо підвищення вологості до 45%, що можна вважати наслідком зниження температури доданого повітря майже на 2,5 градуси. Зона 2, як і в попередньому дослідженні, відсутня, а зона 1 вказує на дещо меншу концентрацію біля вікон провітрювання.

Стан розподілу водяної пари о 21.00: в середньому маємо подальше підвищення вологості до 67%, що можна вважати наслідком зниження температури припливного потоку до 16,1 градуси. Зона 2, як і в попередньому дослідженні, відсутня, а зона 1 наближується до вигляду, який вона мала на початковому стані експерименту (рис. 4.17а).

Отримані значення середньої витрати дозволило розрахувати втрату водяної пари теплиці на основі чого побудовано залежність для компенсації вологості повітря впродовж доби (рис. 4.18). Також було зроблено висновок, інтервал змін режиму зволоження має не перевищувати 3 годин зранку і ввечері, і може мати більше значення вдень і вночі.

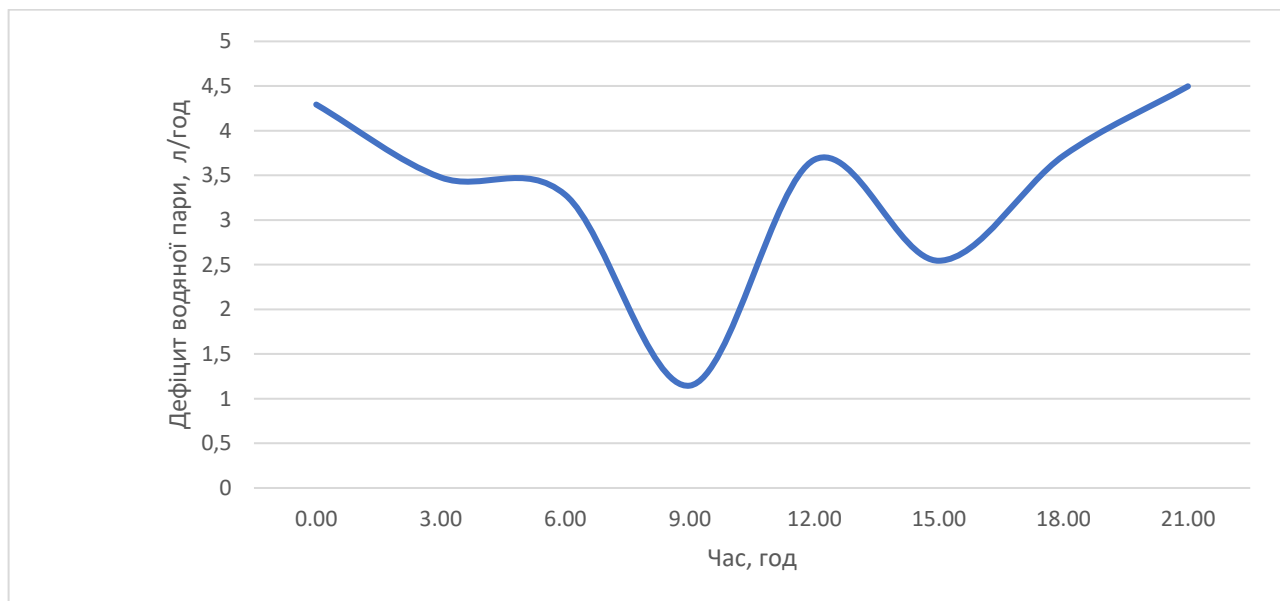


Рис.4.18. Функції дефіциту водяної пари теплиці

Отже, проаналізувавши отримані результати дослідження можна зробити висновок, що максимальна концентрація водяної пари досягається при поданні припливного повітря в тепличний об'єкт з температурою 20,7 °С та вологістю

62%. За отриманими результатами дослідження було розраховано необхідну кількість водяної пари для компенсації балансу вологості теплиці.

4.6. Дослідження перетікання рідини та розпилення форсунки

Для перевірки рівняння масопереносу було побудовано 3D модель форсунки, та перевірено її працездатність за допомогою програмного забезпечення SolidWorks з декількома граничними умовами. Використавши інструмент Flow Simulation було змодельовано перетікання рідини та розпилення форсунки [91, 105]. Перші граничні умови для моделювання розпилення форсунки (рис.4.19): Витрата, $Q = 10 \frac{\text{л}}{\text{хв}}$; Тиск, $p = 10$ бар.

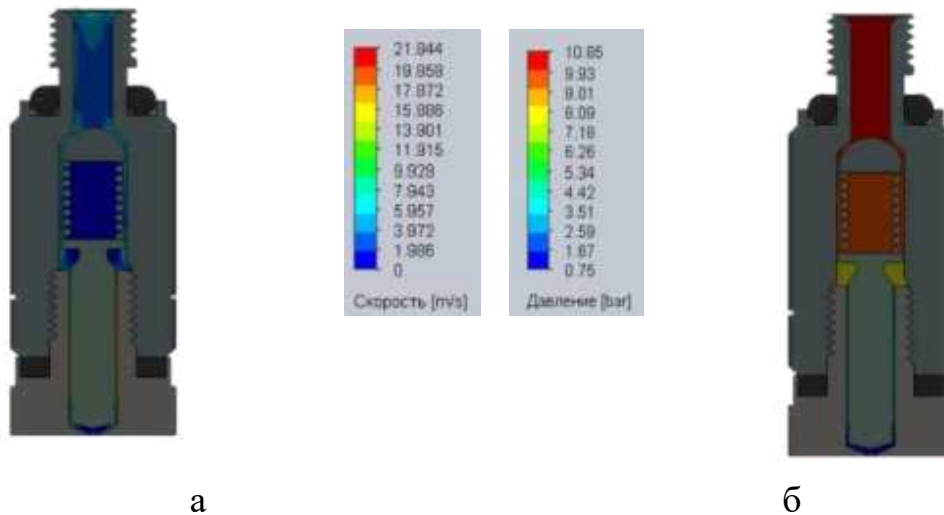


Рис.4.19. Епюри розподілу параметрів робочої рідини в форсунці: а - епюра розподілу швидкостей; б - епюра розподілу тиску

Максимальна швидкість досягається при проходженні рідини між пістоном та соплом, на виході з форсунки значення швидкості $V = 2$ м/с та тиски від 0,75 до 1,67 бар [91]. Другі граничні умови для моделювання розпилення форсунки (рис.4.20): Витрата, $Q = 15 \frac{\text{л}}{\text{хв}}$; Тиск, $p = 15$ бар.

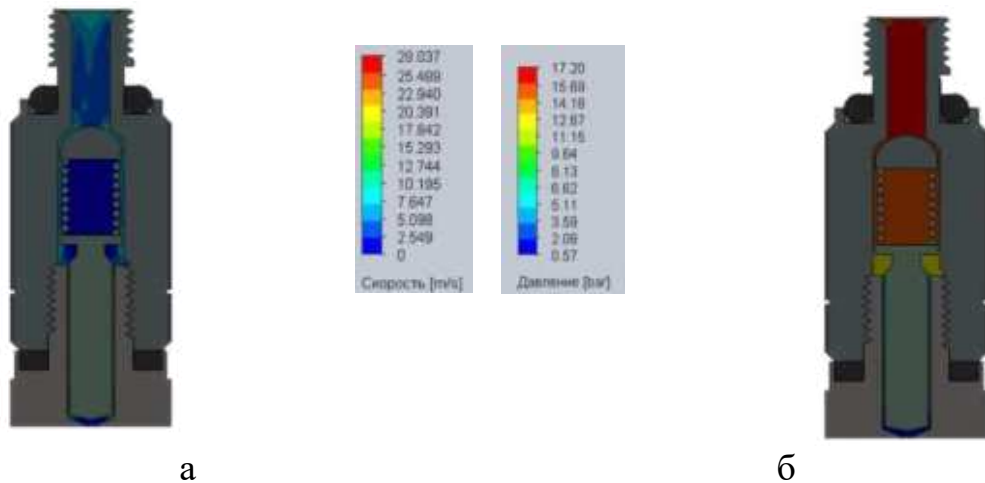


Рис 4.20. Епюри розподілу параметрів робочої рідини в форсунці: а - епюра розподілу швидкостей; б - епюра розподілу тиску

Після збільшення витрати та тиску значно збільшилась швидкість потоку рідини між пістоном та корпусом форсунки, але при цьому тиски на виході залишились в тих самих діапазонах [91].

Треті граничні умови для моделювання розпилення форсунки (рис. 4.21):

Витрата, $Q = 15 \frac{\text{л}}{\text{хв}}$; Тиск, $p = 60$ бар.

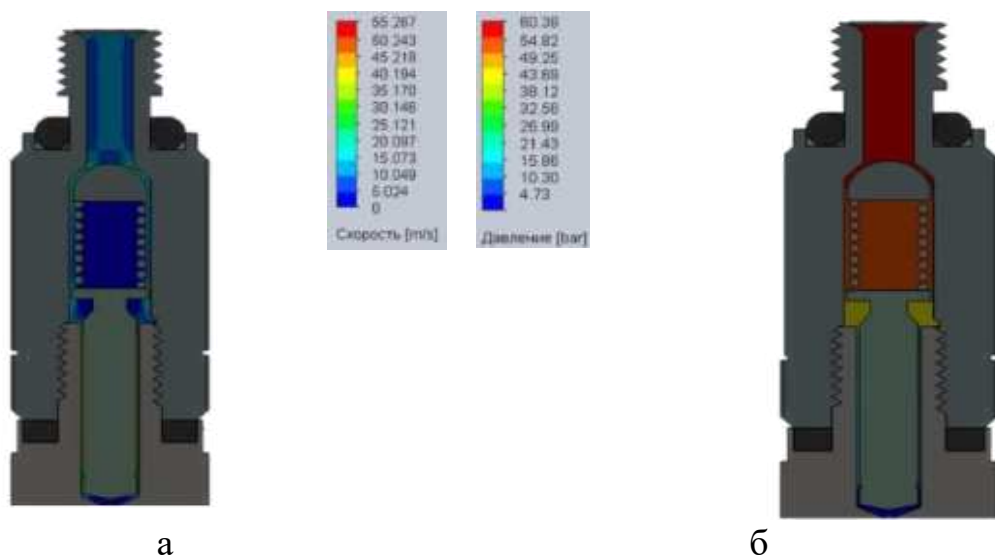


Рис 4.21. Епюри розподілу параметрів робочої рідини в форсунці: а - епюра розподілу швидкостей; б - епюра розподілу тиску

При моделюванні процесу розпилення при проходженні рідини між пістоном та соплом, на виході з форсунки досягається значення швидкості $V =$

30 м/с та тиск до 2 бар. Провівши розрахунки для даного прототипу теплиці з урахуванням кута розпилення 68° визначено, що діаметр розпилення одної форсунки буде складати 2,5 метри (рис.4.22) [105].

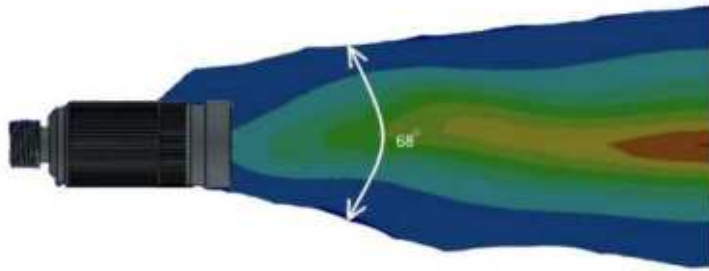


Рис4.22. Кут розпилення форсунки

Тому для забезпечення рівномірного зволоження теплиці з габаритними розмірами 7x4 метри достатньо 3 форсунки. Форсунки мають працювати одночасно з внутрішньою циркуляцією повітря. Таким чином дане дослідження є основою для мехатронної системи керування вологістю, яка буде працювати узгоджено до інтенсивності розпилення, часу роботи, кількості вмикання та впорядкованості.

Висновки по розділу

- На основі моделювання тепло-масо-обмінних процесів в геометричній 3-D моделі теплиці отримані функції витрати теплової потужності та добового дефіциту вологості теплиці впродовж доби.
- Створено та перевірено на правдоподібність модель мікроклімату теплиці, за допомогою якої було визначено тривалість перехідних процесів під дією збуджуючих факторів, яка складає по швидкості до 60 секунд з подальшими коливаннями до 5%, по тиску до 3 ... 5 секунд з подальшою стабілізацією впродовж 50 секунд.

- Шляхом моделювання процесі теплообміну визначено вплив температурного та повітря-швидкісного параметрів тепличного об'єкту на локальні та інтегральні функції зміни швидкості, температури, тиску і вологості.
- Визначено необхідну кількість і розташування датчиків температури та датчиків швидкості по вертикальній площині з перерізом вхідного вікна провітрювання.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА АЛГОРИТМА КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ ПНЕВМО-ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ МІКРОКЛІМАТУ

5.1. Загальний алгоритм програми керування нагрівачами

Загальний алгоритм програми керування нагрівачами передбачає

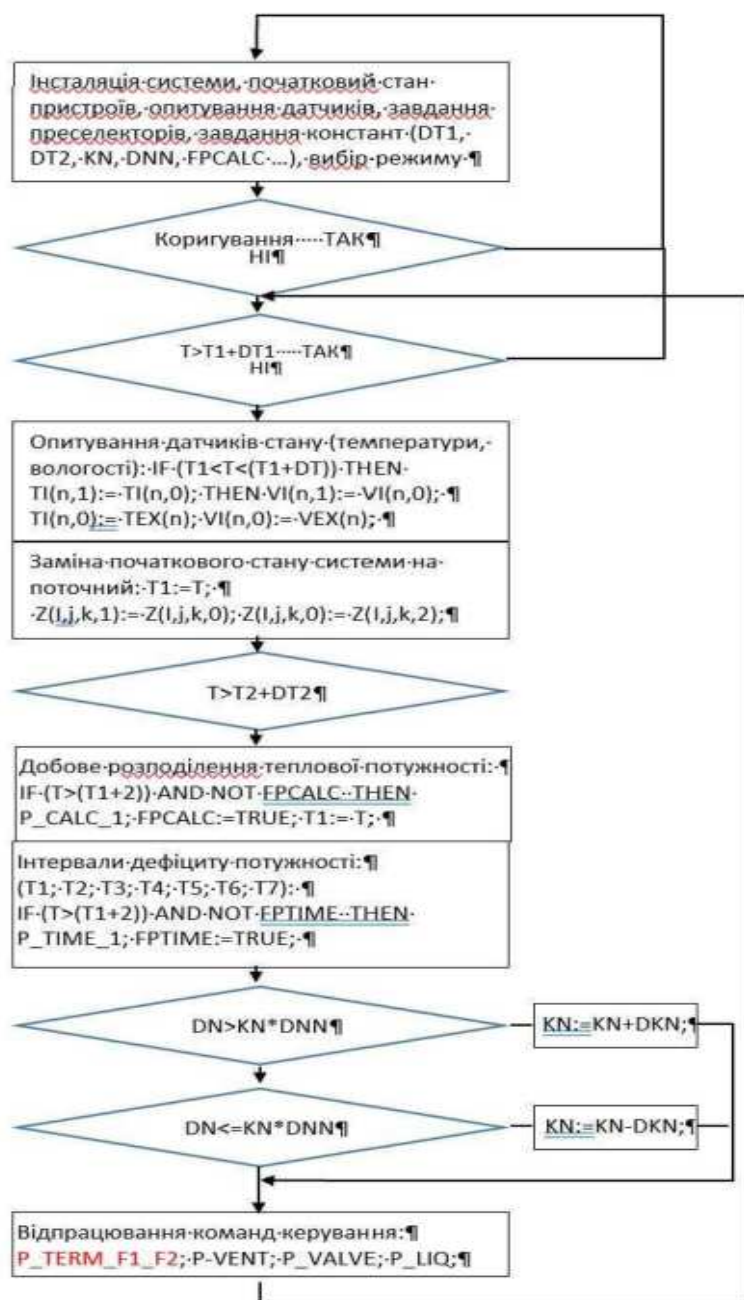


Рис. 5.1. Загальний алгоритм програми керування нагрівачами

вмикання системи, оновлення значень керуючих змінних, опитування датчиків та оновлення стану системи, корегування констант та загальне керування роботою виконавчих пристроїв (рис.5.1).

При вмиканні системи керування першочергово відбувається збір поточних даних з усіх виконавчих пристроїв та датчиків. Далі програма переходить в початковий стан, оновлюються входи та виходи контролера (за необхідності може бути вибрано автоматичний або ручний режими керування). Також, за потреби, відбувається корегування значень констант (інтервал часу, діапазон потужності, ступінь відкриття або закриття каналів). Після корегування констант відбувається перерахування початкових даних. По завершенні інтервалу часу T_1 відбувається опитування датчиків стану тепличного об'єкту, одночасно зберігаються попередні поточні дані. Також при вибігу часу T_1 початкові дані замінюються на поточні, а при виході за межі інтервалу T_2 здійснюється перерахунок компенсуючої теплової потужності [87,88]. Відповідно до поточних змін температури здійснюється перерахування інтервалів сталої потужності. Якщо регулювання температури не знаходиться в допустимому діапазоні – зменшується або збільшується час роботи нагрівачів.

5.2. Режим роботи нагрівачів та програма керування

Для розрахунку режимів роботи нагрівачів було використано, в якості прикладу, зміни температури повітря відповідно до прогнозу [66,87]. З врахуванням середнього значення теплової потужності, для компенсації втрати тепла в замкненому тепличному об'ємі, запропоновано використати два калорифери потужністю 3 кВт та 1 кВт. Місця встановлення нагрівачів зображено на рисунку 2.8.

Визначення терміну вмикання i -го нагрівача регламентується накопиченим дефіцитом теплової енергії:

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} Q_d(t) dt = N_{Fi} * \Delta t,$$

де t_0 - поточний час,

Q_d - функція добових втрат потужності відповідно результатів моделювання (рис.4.18),

N_{Fi} - потужність нагрівача(ів),

Δt - тривалість поточного вмикання калорифера.

В залежності від початкового значення втраченої теплової потужності обираємо вмикання одного або двох калориферів (рис.5.2).

З побудованої циклограми видно, що калорифер на 3 кВт буде працювати з 22 години по 9 годину ранку, калорифер на 1 кВт буде працювати з 9 години по 11 годину ранку, з 13 години по 17 годину та з 19 години по 22 годину. З 11 години по 13 годину та з 17 години по 19 годину – не працюватиме жоден калорифер. Відповідно до отриманого режиму роботи калориферів був розроблений алгоритм для системи керування. Алгоритм реалізовано в середовищі CoDeSys на мові програмування ST.

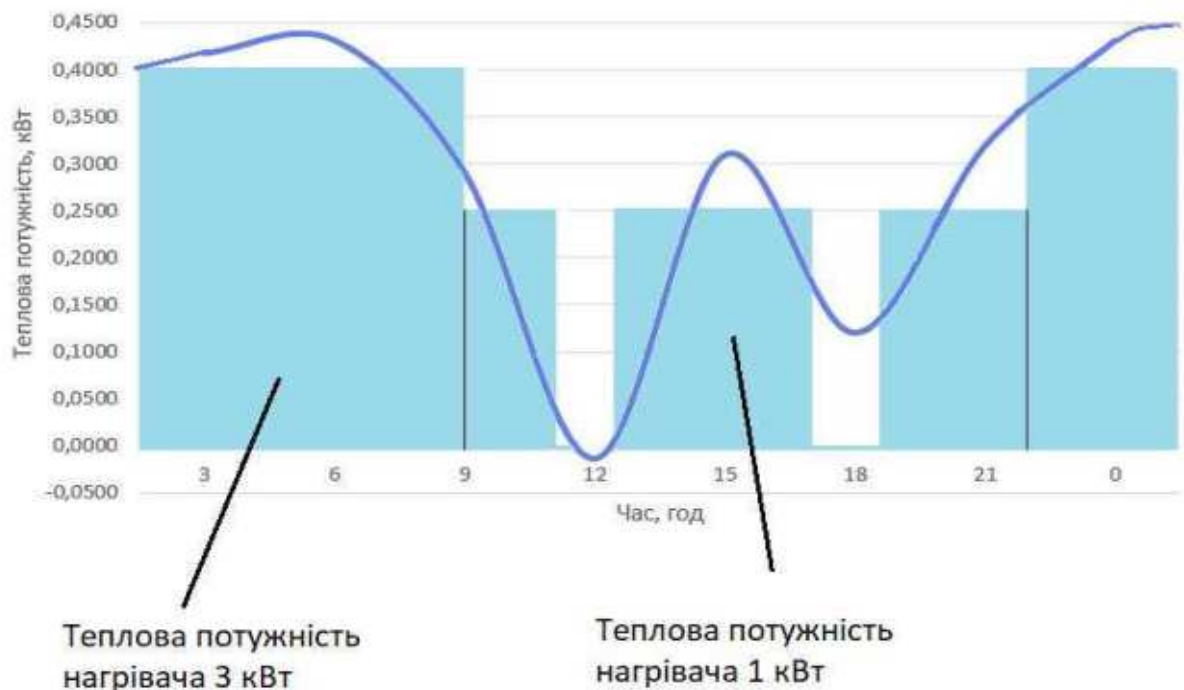


Рис. 5.2. Прогнозована зміна втрати теплової потужності з циклограмою включення та вимкнення компенсуючих нагрівачів

Відпрацювання команд керування нагрівачами наведено в фрагменті коду:

Програма:

PROGRAM P_TERM_F1_F2

VAR

F1_Status : BOOL; (* Статус калорифера F1 *)

F2_Status : BOOL; (* Статус калорифера F2 *)

T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 : INT; (* Час для калориферів *)

END_VAR

(* Основний алгоритм *)

IF T > 0 AND T <= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 + T7 THEN

IF T <= T1 THEN

F1_Status := TRUE;

F2_Status := TRUE;

ELSIF T <= T1 + T2 THEN

F1_Status := FALSE;

F2_Status := TRUE;

ELSIF T <= T1 + T2 + T3 THEN

F2_Status := FALSE;

ELSIF T <= T1 + T2 + T3 + T4 THEN

F2_Status := TRUE;

ELSIF T <= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 THEN

F2_Status := FALSE;

ELSIF T <= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 THEN

F2_Status := TRUE;

ELSE

F1_Status := TRUE;

F2_Status := TRUE;

END_IF;

ELSE

F1_Status := FALSE;

F2_Status := FALSE;

END_IF;

Отримана в результаті модельного експерименту залежність змін потужності нагрівачів у часі показує, що для теплиці достатньо використання двох нагрівачів потужністю 3 кВт і 1 кВт з відповідним графіком їх підключення впродовж доби. Відповідно до отриманої добової циклограми роботи нагрівачів був розроблений алгоритм керування елементами пневмо-гідравлічної мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST), який адаптується під зміни зовнішнього середовища.

5.3. Режим роботи форсунок

Для визначення режимів вмикання/вимикання форсунок було виконано розрахунок доданої витрати вологості на прикладі зміни параметрів повітря відповідно до добового прогнозу погоди [92,93], яке наведено в розділі дослідження тепло-масообмінних процесів в теплиці середнього об'єму. За результатами розрахунку, для компенсації втрати вологості в тепличному об'ємі, запропоновано використати три форсунки продуктивністю 2 л/год. Місця встановлення форсунок обрано за характеристикою сталої осередненої витрати по площі зволоження (рис. 2.10).

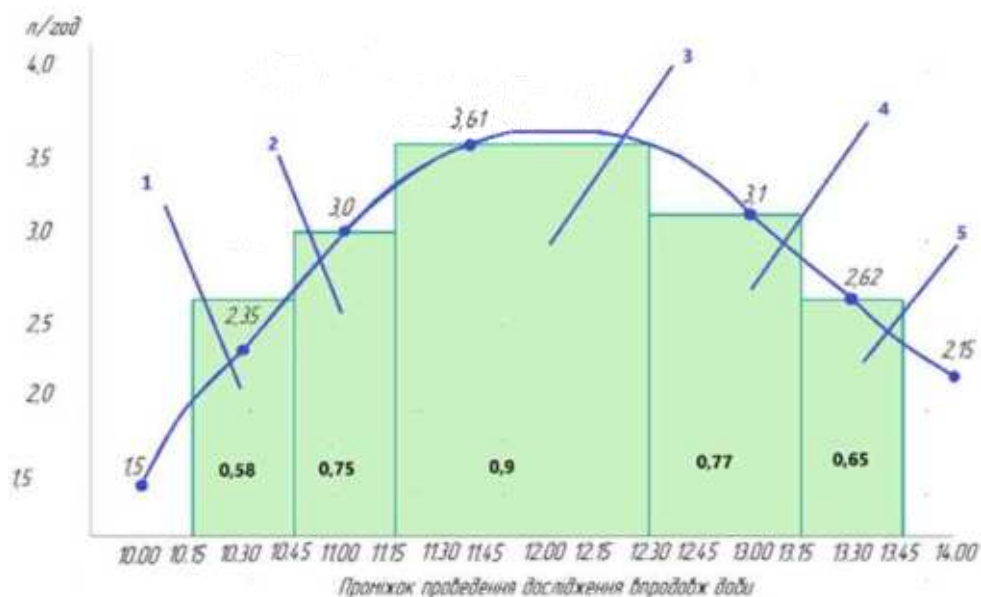


Рис. 5.3. Прогнозована зміна втрати вологості повітря з циклограмою включення та вимкнення компенсуючих форсунок

Наступний крок – визначення термінів та черговості вмикання форсунок системи туманоутворення. Визначення терміну вмикання форсунок регламентується накопиченим дефіцитом водяної пари:

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} K_d(t)dt = Q_N * \Delta t,$$

де: t_0 - поточний час;

K_d - функція добових витрат вологості відповідно результатів моделювання (рис. 4.18);

Q_N – продуктивність форсунки(ок);

Δt - тривалість поточного вмикання форсунок.

В залежності від поточного і прогнозованого значення втраченої вологості повітря обираємо вмикання одної, двох або трьох форсунок (рис.5.3). З побудованої циклограми видно, що для забезпечення компенсації втрат водяної пари необхідно вмикати дві форсунки продуктивністю 2 л/год. Розподіл терміну вмикання між трьома форсунками має забезпечувати рівномірне зволоження теплиці. Відповідно до залежності прогнозованих змін вологості визначено наступні режими роботи компенсуючих форсунок.

- Перший режим: дві форсунки працюють з 10.15 по 10.45, тривалість режиму складає 30 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 2,35 л/год. Отже, при сумарній продуктивності двох форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок (інтегральна скважність) складатиме 0,58, а реальний час роботи форсунок – 17,4 хвилин (термін вимкнених форсунок складає 12,6 хвилин);

- Другий режим: дві форсунки працюють з 10.45 по 11.15, тривалість режиму складає 30 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 3,0 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,75, а час роботи форсунок – 22,5 хвилини (стан спокою складає 7,5 хвилин);

- Третій режим: дві форсунки працюють з 11.15 по 12.30, тривалість режиму складає 75 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації

вологості повітря складає 3,61 л/год. Тобто, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,9, а час роботи форсунок – 67,5 хвилин (стан спокою складає 7,5 хвилин);

- Четвертий режим: дві форсунки працюють з 12.30 по 13.15, тривалість режиму складає 45 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 3,1 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,77, а час роботи форсунок – 34,65 хвилин (стан спокою складає 10,35 хвилин);

- П'ятий режим: дві форсунки працюють з 13.15 по 13.45, тривалість режиму складає 30 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 2,62 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,65, а реальний час роботи форсунок – 19,65 хвилин (стан спокою складає 10,35 хвилини).

5.4. Загальний алгоритм та програма керування форсунками

В алгоритмі передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплекту команд керування [94,95,96].

В режимі налагоджування може здійснюватися корегування констант для випадку непередбачених змін параметрів зовнішнього повітряного і рідинного середовища та параметрів мікроклімату, наприклад, покриття поверхні кригою чи вихід з ладу приводів вікон.

При вмиканні системи керування першим етапом відбувається оновлення інформації стосовно положень та стану виконавчих пристроїв та опитування датчиків. На другому етапі, за необхідності корегування роботи системи, програма повертається на початковий етап. Відбувається оновлення входів та виходів контролера (можливий вибір автоматичного або ручного керування).

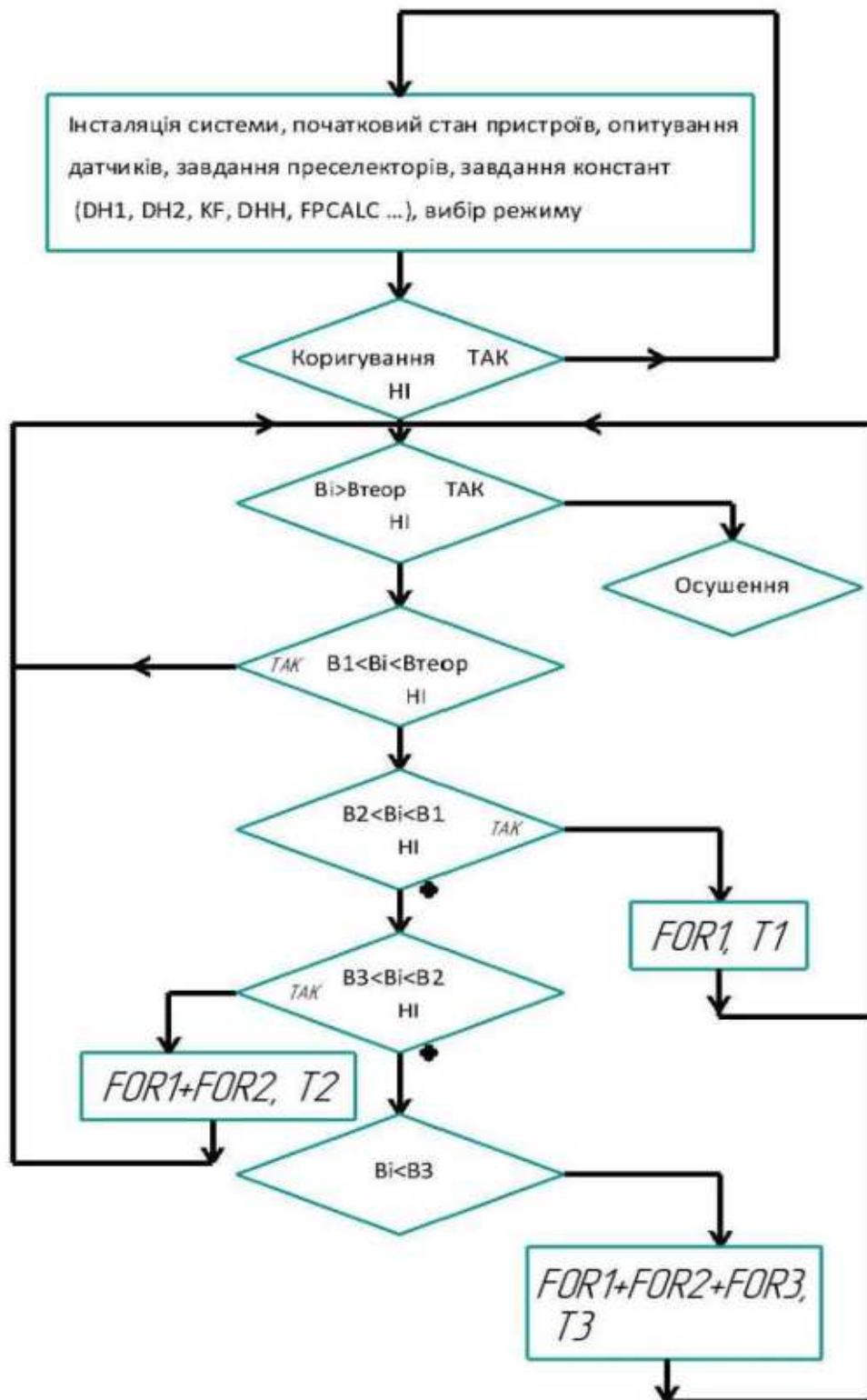


Рис. 5.4. Загальний алгоритм програми керування форсунками

Відбувається корегування значень констант (інтервал часу роботи форсунок, кількість форсунок). Після корегування констант здійснюється перерахунок початкових даних і система переходить до відпрацювання режимів роботи системи туманоутворення. Якщо поточне значення вологості (B_i) більше за

необхідне ($B_{\text{теор}}$) система переходить в режим осушення. Якщо ж значення вологості повітря не перевищує 70% програма керування перевіряє умови щодо вибору наступного режиму. Відбувається оновлення сигналів датчиків стану тепличного об'єкту, одночасно зберігаються попередні поточні дані, здійснюється порівняння даних для визначення напрямку і інтенсивності процесу. При попаданні вологості в інтервал від B_1 до B_2 алгоритм керування вмикає виконавчий орган (форсунку FOR1) на час T_1 . При вибігу часу T_1 початкові дані замінюються на поточні, а поточні дані оновлюються. При потраплянні значень вологості в інтервал від B_2 до B_3 , алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2) на час T_2 . При вибігу часу T_2 початкові дані замінюються на поточні. При подальшому зниженні вологості нижче B_3 алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2, та FOR3) на час T_3 . При вибігу часу T_3 початкові дані замінюються на поточні, а поточні дані оновлюються. Відповідно до поточної зміни вологості повітря в тепличному об'єкті здійснюється перерахунок співвідношення часу вмикання і вимикання форсунок та кількості задіяних форсунок. Алгоритм керування може бути реалізовано, наприклад, в середовищі Zelio Soft чи CoDeSys на мові FBD чи ST або LD, і спрямоване на використання логічного контролера, наприклад, SIEMENS S7-1200, чи Schneider TM241CE40U.

Вихідні умови: Форсунки: FOR1, FOR2, FOR3. Вхідні змінні: humidity: Поточний рівень вологості в 70%. Логіка процесу керування базується на визначенні і відпрацюванні режимів в трьох діапазонах вологості: 70-65 %: працює одна форсунка; 65-60 %: працюють дві форсунки; 60-50 %: працюють три форсунки. Співвідношення термінів вмикання і вимикання форсунок розраховано відповідно до дефіциту вологості і кількості задіяних форсунок. Наприклад, у режимі роботи №3 розрахунок здійснюється за середнім значенням дефіциту вологості, який складає 3,61 л/год. Використовуючи співвідношення роботи форсунок та стану спокою, форсунки мають працювати поки не буде досягнене середнє значення вологості у відповідному режимі. Коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,9. Отже, якщо загальний час

роботи режиму складає 75 хвилин (T_0), відповідно час роботи форсунок $T_1 = 0,9 * T_0$ і складає 67,5 хвилин. Так, як $T_1 + T_2 = T_0$, то час спокою форсунок $T_2 = T_0 - T_1$ і буде становити 7,5 хвилин.

Таймери: timerWork: працює протягом 67,5 хвилин, потім переходить до режиму паузи. timerPause: працює протягом 7,5 хвилин паузи, потім повертає до режиму роботи.

Відпрацювання команд керування форсунками наведено в фрагменті коду:

Програма:

PROGRAM **P_HUM_For1_For2_ For3**

humidity: REAL:= 70; // Поточна вологість у %

FOR1: BOOL:= FALSE; // Статус першої форсунки

FOR2: BOOL:= FALSE; // Статус другої форсунки

FOR3: BOOL:= FALSE; // Статус третьої форсунки

timerWork: TON; // Таймер для роботи форсунок

timerPause: TON; // Таймер для паузи між циклами

workState: BOOL:= TRUE; // Стан: TRUE - працює, FALSE - пауза

END_VAR

// Налаштування таймерів

timerWork(IN := workState AND NOT timerWork.Q, PT := T#T1m); // Час роботи форсунок

timerPause(IN := NOT workState AND NOT timerPause.Q, PT := T#T2m); // Час паузи

// Логіка управління форсунками

IF workState THEN

// Визначення кількості активних форсунок залежно від вологості

IF humidity >= 65 THEN

FOR1:= TRUE;

FOR2:= FALSE;

FOR 3:= FALSE;

ELSIF humidity >= 60 AND humidity < 65 THEN

```

    FOR1:= TRUE;
    FOR2:= TRUE;
    FOR3:= FALSE;
ELSIF humidity >= 50 AND humidity < 60 THEN
    FOR1:= TRUE;
    FOR2:= TRUE;
    FOR3:= TRUE;
ELSE
    FOR1:= FALSE;
    FOR2:= FALSE;
    FOR3:= FALSE;
END_IF;
ELSE
    // Під час паузи всі форсунки вимкнені
    FOR1:= FALSE;
    FOR2:= FALSE;
    FOR3:= FALSE;
END_IF;
// Перехід між станами (робота ↔ пауза)
IF timerWork.Q THEN
    workState := FALSE; // Закінчення роботи, перехід до паузи
    timerWork(IN := FALSE); // Скидання таймера роботи
END_IF;
IF timerPause.Q THEN
    workState := TRUE; // Закінчення паузи, перехід до роботи
    timerPause(IN := FALSE); // Скидання таймера паузи
END_IF;

```

Результати розрахунків показали, що для теплиці вказаного об'єму достатньо використання двох компенсуючих форсунок продуктивністю 2 л/год кожна з відповідним графіком їх підключення впродовж доби. Запропонований

часовий розподіл роботи компенсуючих форсунок задовільнить вимоги до режиму вологості мікроклімату теплиці.

5.5. Порівняльний розрахунок діаграми ефективності пневмо-гідравлічної мехатронної системи з упереджувачим керуванням

Для порівняння обрано базовий варіант з дискретним керуванням нагрівачами і система з упереджувачим керуванням (рис.5.5). Нагрівачі базового варіанта системи мають відслідковувати вихід температури в теплиці за встановлені межі мінімальної температури і максимальної температури. Нагрівачі випереджувачого керування отримують сигнал на увімкнення ще до зниження температури нижче регламентованого рівня. Таким чином система використовує теплицю в якості акумулюючого пристрою, який накопичує достатньо теплової енергії для існування комфортного режиму впродовж терміну збалансованих від'ємного і додатного теплових потоків.

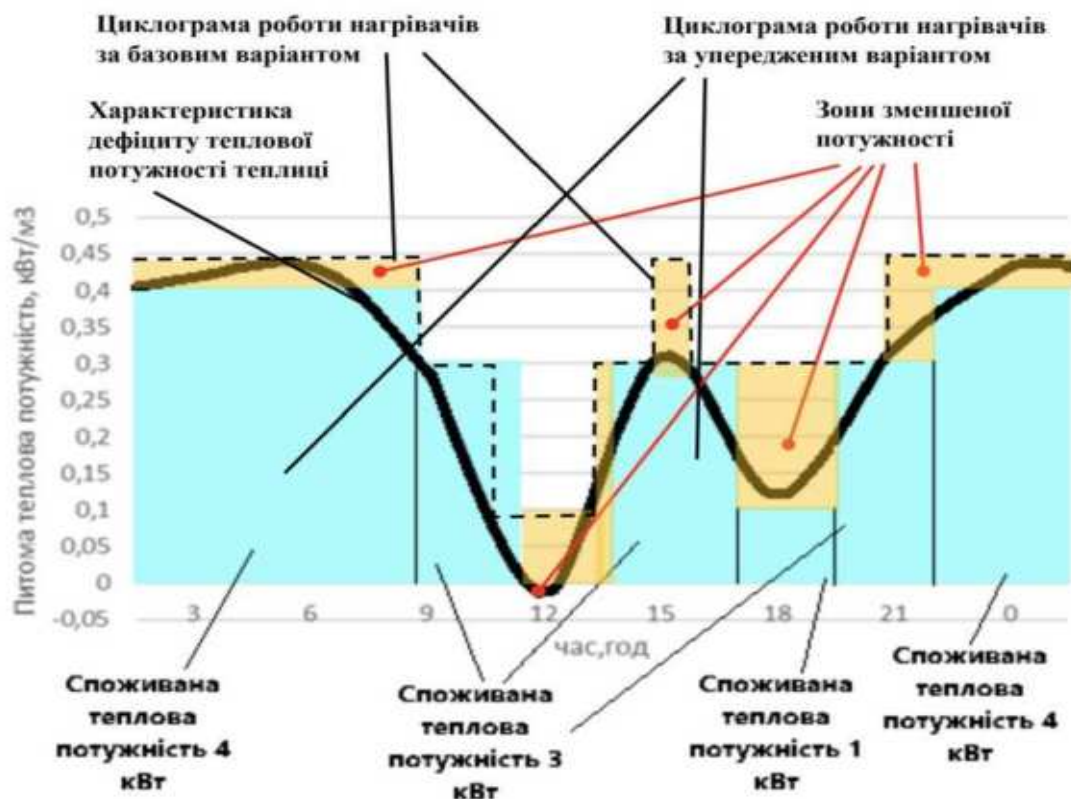


Рис. 5.5. Діаграма ефективності нагрівачів за базовим та упереджувачим варіантами

Добове споживання енергії системою обігріву у загальному випадку визначаємо наступним чином:

$$E_{24} = \sum_{i=1}^k \int_0^{24} N_i X_i(t) dt,$$

де:

N_i - потужність i -го нагрівача,

X_i - сигнал підключення i -го нагрівача в функції часу згідно циклограми роботи нагрівачів,

k – кількість нагрівачів.

Умовою вмикання нагрівачів за базовим варіантом є охолодження повітря нижче за нижню допустиму межу:

$$X_i^{base} = 1 \Leftarrow T \leq T_{min}.$$

Умовою вимикання нагрівачів за базовим варіантом є верхня межа температури повітря з коефіцієнтом запасу на нерівномірність поля температур та термін перехідного процесу стабілізації температури, який прийнято в розрахунках 1,15:

$$X_i^{base} = 0 \Leftarrow T \leq k_{stab} * T_{max}.$$

Добова сумарна витрата енергії за базовим варіантом для прикладу добової залежності дефіциту теплової потужності має значення (рис. 5.5):

$$\begin{aligned} & 4,5 * 7,35 \text{ год} + 3,0 * 2,0 \text{ год} + 1,0 * 2,75 \text{ год} + 3,0 * 1,4 \text{ год} + 4,5 * 1,2 \text{ год} + 3,0 * \\ & 4,4 \text{ год} + 4,5 * 4,9 \text{ год} = 4,5 * 56\% + 3,0 * 32,5\% + 1,0 * 11,5\% = \\ & = 60,525 + 23,4 + 2,75 = 86,68 \text{ кВт*год} \end{aligned}$$

Умовою вмикання нагрівачів з системою керування за упередженим варіантом є баланс теплової втраченої і теплової доданої енергії за певний проміжок часу при фіксованому значенні потужності нагрівача:

$$X_i^{base} = 1 \Leftarrow (tset \leq t \leq reset) \wedge \left\{ \int_{tset}^{treset} (N_i - \int_{tset}^{treset} \Phi_{dif}(t) dt) dt = 0 \right\},$$

де:

Φ_{dif} - функція дефіциту теплової потужності у часі.

Умовою вимикання нагрівачів за упередженим варіантом є вихід із інтервалу зони збалансованої теплової втраченої і доданої енергії при фіксованому значенні потужності нагрівача:

$$X_i^{base} = 0 \Leftrightarrow (tset \leq t \leq reset) \wedge \left\{ \left| \int_{tset}^{treset} (N_i - \int_{tset}^{treset} \Phi_{dif}(t) dt) dt \right| > 0 \right\}$$

У випадку від'ємного балансу енергії має бути розрахованим варіант використання нагрівача наступного ступеню потужності (у нашому випадку це 3,0 кВт), або одночасного використання двох нагрівачів (4 кВт).

У випадку додатного балансу енергії має бути розрахованим варіант використання нагрівача меншої потужності (у нашому випадку це 3 кВт або 1 кВт), або відключення обох нагрівачів на певний час, до отримання інтервалу з від'ємним балансом теплової потужності (в прикладі інтервал в 2,2 години).

Добова сумарна витрата енергії за упередженим варіантом для прикладу добової залежності дефіциту теплової потужності має значення :

$$4,0 * 7,3 \text{ год} + 3,0 * 2,8 \text{ год} + 0,0 * 2,2 \text{ год} + 3,0 * 3,0 \text{ год} + 1,0 * 2,5 \text{ год} + 3,0 * 2,6 \text{ год} + 4,0 * 3,6 \text{ год} = 4,0 * 45,42\% + 3,0 * 35\% = 43,6 + 25,2 + 2,5 = 71,3 \text{ кВт*год}$$

За результатами порівняльного розрахунку різниці спожитої за добу енергії базовою системою і системою з упередженою системою керування складає :

$$\Delta F_{\text{доб}} = 86,68 \text{ кВт} * \text{год} - 71,3 \text{ кВт} * \text{год} = 15,4 \text{ кВт} * \text{год}.$$

Таким чином, для наведеного прикладу прогнозу добових змін температури оточуючого повітряного та рідинного середовища економія споживання енергії системою обігріву складає 18%. Аналогічні розрахунки для інших періодів експлуатації (з підвищеним захмаренням, ясною погодою, різні пори року) надали від 12% до 26% зменшення енерговитрат. Таким чином, якщо прийняти за середньорічний показник 20% і вважати, що експлуатаційний період триває 7 ... 10 місяців (за винятком технічного обслуговування та рекультиваційних робіт), то показник зменшення енерговитрат для однієї теплиці складатиме:

$$\text{мінімальне } \Delta E_{\text{рік}} = 15,4 \text{ кВт*год} * 210 = 3234 \text{ кВт*год};$$

$$\text{максимальне } \Delta E_{\text{рік}} = 18,375 \text{ кВт*год} * 305 = 4697 \text{ кВт*год}.$$

За умов вартості електроенергії 4 грн/кВт*год річне застосування упередженого керування надає у вартісному виразі відповідно від 12936 грн до 18788 грн. А за умов наявності значної кількості теплиць в експлуатації обігрів кожної 5-ї теплиці відбуватиметься коштом заощадженої енергії.

Запропонований підхід може бути застосовано до існуючих систем мікроклімату шляхом модернізації систем керування.

Висновки по розділу

- За рахунок розрахованих режимів роботи системи туманоутворення та результатів моделювання добових змін зволоження побудовано загальний алгоритм керування форсунками.
- За рахунок розрахованих режимів роботи системи опалення та результатів моделювання добових теплової потужності теплиці побудовано загальний алгоритм керування нагрівачами.
- Відповідно до отриманих циклограм роботи форсунок та нагрівачів було розроблено алгоритми керування елементами мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST).
- З огляду на те, що упереджена система керування має менше споживання енергії, а існуючі системи вже мають конкретну теплову потужність нагрівачів, вивільнена потужність може бути використана для розширення експлуатаційного діапазону температур зовнішнього повітряного та рідинного середовища або розширення переліку вирощуваних культур в бік теплішого клімату.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами аналітичного огляду відомих технічних рішень систем мікроклімату і їх особливостей встановлено і теоретично обґрунтовано можливість створення мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму з випереджувачим керуванням, що базується на врахуванні прогнозу змін температури і вологості оточуючого повітряного і рідинного середовища. Це дозволяє визначити раціональну структуру мехатронної системи, утримувати значення температури і вологості на межах допустимих значень, забезпечує розширення діапазону експлуатаційних змін температури і вологості оточуючого повітряного і рідинного середовища без збільшення потужності систем обігріву і зволоження.
2. Розроблена, на основі результатів аналізу технічних рішень і особливостей теплиць середнього об'єму, раціональна структура мехатронної системи, яка поєднує гідравлічні підсистеми поливу і зволоження, пневматичні підсистеми повітрообміну і рециркуляції та керування виконавчими приводами, електричну підсистему обігріву, які об'єднані централізованим PLC керуванням з моніторингом параметрів теплиці і стану виконавчих пристроїв.
3. Встановлено, що на основі моделювання тепло-масо-обмінних процесів в геометричній 3-D моделі теплиці можуть бути отримані функції витрати теплової потужності теплиці впродовж доби, що дозволяє визначати залежності дефіциту теплової потужності теплиці з врахуванням прогнозу щодо добових змін погодних умов.
4. Запропоновано, на основі добової залежності дефіциту теплової потужності теплиці, застосувати упереджувачий алгоритм керування, який забезпечує баланс дефіциту теплового потоку і доданого теплового потоку від обігрівачів на окремих прогнозованих інтервалах часу, утворених навколо точок, в яких від'ємний тепловий потік дорівнює фіксованим значенням потужності нагрівачів, що дозволяє побудувати структуру процесу роботи

- компенсуючих обігрівачів впродовж доби з врахуванням прогнозу щодо добових змін погодних умов.
5. Створено та перевірено на правдоподібність модель мікроклімату теплиці середнього об'єму, використання якої дозволило визначити тривалість перехідних процесів під дією збуджуючих факторів, а саме змін температури зовнішнього повітряного і рідинного середовища та змін витрати повітрообміну.
 6. Шляхом модельних випробувань визначено вплив температурного та повітря-швидкісного параметрів тепличного об'єкту на локальні та інтегральні функції зміни швидкості, температури, тиску і вологості, що спостерігаються у замкненому об'ємі теплиці, що дозволило, на основі отриманого розподілу температури та швидкості в об'ємі теплиці та регламентованих максимальних і мінімальних значень, визначити раціональні точки контролю відповідних параметрів для встановлення датчиків.
 7. За результатами модельних досліджень встановлено, що локальні функції коливань температури спостерігаються у всіх точках об'єкту дослідження до 10 секунд, а інтегральна функція зміни температури сягає сталого значення близько 30-ї секунди, що дозволяє визначити термін перехідного процесу для системи обігріву. Локальні функції зміни швидкості спостерігають у всіх точках об'єкту дослідження, які знаходяться в одній площині з вхідними вікнами провітрювання, до 60 секунд при 30-кратному повітрообміні, а інтегральна функція зміни параметру стабілізується 10...15 секунд, що дозволяє визначити термін перехідного процесу для системи провітрювання.
 8. Визначено необхідну кількість і розташування датчиків температури та датчиків швидкості по вертикальній площині з перерізом вхідного вікна провітрювання, які враховують термін стабілізації температури в тепличному об'єкті, що складає близько 10 секунд, та час стабілізації швидкості з врахуванням коливального процесу з допустимою амплітудою 0,05 м/сек, який не перевищує 60 ... 90 секунд.

9. Отримана, за результатами модельних досліджень з врахуванням добових змін температури оточуючого повітряного і рідинного середовища, функція змін дефіциту потужності нагрівачів у часі показала, що для теплиці достатньо використання двох нагрівачів потужністю 3 кВт і 1 кВт з відповідним графіком їх випереджуючого підключення впродовж доби, що дозволяє обігрівати теплицю по двозональному тарифу за електроенергію і є економічно вигідним під час експлуатації тепличного об'єкту в холодний період року.
10. Відповідно до отриманої добової циклограми роботи нагрівачів розроблений і перевірений на імітаційній моделі алгоритм керування елементами мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST) та система керування виконавчих пристроїв (FluidSIM).
11. Встановлено, що з врахуванням тепло-масо-обмінних процесів в геометричній 3-D моделі теплиці можуть бути змодельовані зміни витрати водяної пари теплиці впродовж доби, а отримані залежності зниження концентрації вологості в повітрі дозволяють визначити циклограму роботи компенсуючих форсунок та побудувати алгоритм керування у часі.
12. Отримана, в результаті модельних досліджень, функція добового дефіциту вологості впродовж доби дозволила розрахувати функцію необхідної продуктивності компенсуючих форсунок у часі, що підтвердило, що для теплиці вказаного об'єму достатньо одночасного використання двох з трьох компенсуючих форсунок продуктивністю 2 л/год кожна з відповідною циклограмою їх підключення. Відповідно до отриманих результатів побудовано структуру процесу роботи форсунок було розроблено алгоритм керування елементами мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST).
13. За результатами порівняльних розрахунків діаграми ефективності показано, що використання упереджуючого алгоритму керування, з розподіленням доби на інтервали часу із збалансованими потоками дефіциту теплової потужності і роботою обігрівачів забезпечує (12 ... 26)% скорочення

енергоспоживання за рахунок використання узгодження дії системи керування з енергоакумуючими властивостями теплиці. Запропонований підхід може бути застосовано до існуючих систем мікроклімату шляхом модернізації систем керування з врахуванням потужності існуючих нагрівачів, а вивільнена потужність може бути використана для розширення експлуатаційного діапазону температур зовнішнього повітряного і рідинного середовища або розширення переліку вирощуваних культур в бік теплішого клімату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Збірник. Навіщо потрібна теплиця: Плюси та мінуси тепличного вирощування (2023) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://novateplica.com.ua/uk/zachem-nuzhna-teplicza-plyusy-i-minusy-teplichnogo-vyrashhivaniya/>.
- [2] Збірник питань. Теплиці: що це та навіщо вони потрібні? (2024) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://kozak.zapisi.cx.ua/ukraincyam/teplici-shho-ce-ta-navishho-voni-potribni.html>.
- [3] Збірник питань. Теплиці: що таке теплиці п'ятого покоління і чи всім вони потрібні? (2023) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://agrigator.com.ua/2023/08/19/shcho-take-teplytsi-p-iatoho-pokolinnia-i-chy-vsim-vony-potribni-eastfruit/>
- [4] Збірник питань. Як побудувати теплицю в домашніх умовах: ідеї облаштування своїми руками (2020) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: https://lifestyle.24tv.ua/design/teplitsya-z-vikonnih-ram-yak-zrobiti-svoyimi-rukami-vidi-ustanovka_n1429825
- [5] Каталог. Теплиця парник Kontrast-10м2 2,5х4м (2024) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://daddy-store.com.ua/teplytsia-parnyk-kontrast-10m2-25x4m/>
- [6] Збірник питань. Теплиці: Мікроклімат теплиць 5-го покоління за технологією «UltraClima» (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://unitech-clima.com.ua/ru/klimatychni-systemy/mikroklimat-teplyts-5-ho-pokolinnia-za-tekhnohiiieu-ultraclima/>
- [7] Каталог. Автоматичні системи теплиць: які бувають і для чого необхідні (2024) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу: <https://teplitca.kiev.ua/ua/a360381-avtomaticheskie-sistemy-teplits.html>
- [8] Збірник питань. Система поливу для теплиці своїми руками: матеріали, інструменти, план робіт(2020) (електронна стаття). <https://cropper.com.ua/ua/sistema-poliva-dlya-teplicy-svoimi-rukami-materialy-instrumenty-plan-rabot/>

[9]Збірник. Теплиці фермерські, промислові, індивідуальні, (електронна стаття).

Режим доступу до ресурсу:

https://polygonal.com.ua/teplitsI_fermerskI_promislovI_IndivIdualnI.php

[10] Збірник. Типи теплиць та парників. Режим доступу до ресурсу:

<https://vseosvita.ua/lesson/typy-teplyts-ta-parnykiv-mizhnarodnyi-den-vidmovy-vid-palinnia-den-hidnosti-i-svobody-736156.html>

[11] Збірник. Система автоматики для теплиць - основні відомості. Режим

доступу до ресурсу: <https://www.agrotechnical.net.ua/uk/systema-zashtoryuvannya/>

[12] Збірник. Креслення теплиці Митлайдера і варіанти її споруди. Режим

доступу до ресурсу: <https://remontu.com.ua/kreslennya-teplici-mitlajdera-i-varianti-sporudi>

[13] Збірник. Верхній полив в теплиці - система зрошування. Режим доступу до

ресурсу: https://live.staticflickr.com/65535/53340120448_d194f25fe2_o.jpg

[14] Збірник. Тепличний жолоб для дренажної системи багатопрогових

теplicь. Режим доступу до ресурсу: <https://ua.yt-greenhouse.com/greenhouse-accessories/greenhouses-gutter.html>

[15] Збірник. ПРИРОДНЕ ТА ДОДАТКОВЕ ОСВІТЛЕННЯ ТЕПЛИЦІ У РІЗНІ

ПОРИ РОКУ. Режим доступу до ресурсу: <https://teplitca.kiev.ua/ua/a480397-estestvennoe-dopolnitelnoe-osveschenie.html>

[16] Збірник. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В

ЗАХИЩЕНОМУ ҐРУНТІ. Режим доступу до ресурсу:

https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/%D0%B5lektroenergetuka/Avtomotuzacia_tehnologihnuh_procesiv_i_sistemu_avtomatuhnogo_keryvanna/5/5.3.htm

[17] Каталог. Концепція автоматизованої системи теплиці на основі продукції

akYtec (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://akytec.de/en/blog/greenhouse>

[18] Збірник. Система кліматичного контролю. Режим доступу до ресурсу:

<https://www.agrotechnical.net.ua/uk/climate-control-system/>

- [19] Збірник. Клімат та підживлення. Режим доступу до ресурсу: <http://www.utk.org.ua/manufacturing/tech/>
- [20] Барабаш О.В., ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ПІДПРИЄМСТВА, “Технічні науки”, Випуск 2 (32), Київ, Україна, ст.352-361.
- [21] Інноваційна адаптивна система управління для регулювання мікрокліматичних умов у теплиці, Джузеппіна Нікологі, Роберто Вольпе та Антоніо Мессінео Факультет інженерії та архітектури, Університет Коре в Енні, Університет Читтаделли, Енна 94100, Італія;
- [22] ПРОГНОЗУВАННЯ МИКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ, СІНГ, В. К. * - ТІВАРІ, К. Н., Кафедра сільськогосподарського та харчового машинобудування, Індійський технологічний інститут Харагпур, Західна Бенгалія, Індія
- [23] Модель нейронної мережі для прогнозування тепличного мікроклімату за Теодорос Петракіс, Анжеліки Кавга, Василеос Томопулос, Афанасіос А. Аргіріу, Департамент сільського господарства, Університет Патр, 26504 Патри, Греція, <https://doi.org/10.3390/agriculture12060780>
- [24] Вілліц, Д.Х. Охолодження теплиць з вентиляторною вентиляцією: Моделююче дослідження. Biosyst. Eng. 2003, 84, 315-329.
- [25] Еббі, Л.; Рао, С.А. Диференційована реакція видів рослин на мікроклімат теплиць, створений технологією проектування та умовами навколишнього середовища. Can. J. Plant Sci. 2017, 98, 300-308.
- [26] Кітгас, К.; Барцанас, Т. Мікроклімат теплиць та ефективність осушення при різних конфігураціях вентиляторів. Побудова. Environ. 2007, 42, 3774-3784.
- [27] Таділі, Р.; Дахман, А.С. Вплив системи сонячного опалення та кліматизації на мікроклімат сільськогосподарських теплиць. Renew. Energy 1997, 10, 569-576.
- [28] Мироненко Г.П., Спаська Л.І. Тепловий розрахунок споруди захищеного ґрунту. Методичні рекомендації щодо виконання курсової роботи студентам денної і заочної форм навчання спеціальності „Енергетичний менеджмент”. - Х.: ХНТУСГ.

- [29] Automation of microclimate in greenhouses Marina Ganzhur^{1,*}, Alexey Ganzhur¹, Andrey Kobylko¹, and Denis Fathi¹ ¹Don State Technical University, 344003, 1, Gagarin sq., Rostov on Don, Russia
- [30] Sebastian-Camilo Vanegas-Ayala , Julio Baro'n-Velandia and Daniel-David Leal-Lara, A Systematic Review of Greenhouse Humidity Prediction and Control Models Using Fuzzy Inference Systems, Advances in Human-Computer Interaction Volume 2022, Article ID 8483003, 16 pages <https://doi.org/10.1155/2022/8483003>
- [31] Синицина Є., & Губарев О. (2023). «Модель об'єкту керування мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму» - *Mech. Adv. Technol.* Vol. 7, No. 3, 2023, pp. 330–336 <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/290773/289501> (Стаття, Фахове видання України)
- [32] Синицина Є., & Космина С.. (2024). «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - *Mech. Adv. Technol.* 8, вип. 2(101), с. 164–171, Чер 2024. <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/298506/299275> (Стаття, Фахове видання України)
- [33] Синицина Є., & Губарев О. (2024). «МЕХАТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ» - Вісник машинобудування та транспорту, 2024 рік, <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/20> (Стаття, Фахове видання України)
- [34] Мироненко Г.П., Спаська Л.І. Тепловий розрахунок споруди захищеного ґрунту. Методичні рекомендації щодо виконання курсової роботи студентам денної і заочної форм навчання спеціальності „Енергетичний менеджмент”. - Х.: ХНТУСГ.
- [35] <https://ventzavod.com/ru/ventilation/radial-fans/average-pressure-fans/vc-10-28/>
- [36] Буслов В. К. Методичні вказівки до курсового проекту за курсом "Проектування об'ємних гідроприводів" для студентів з фаху "Гідравлічні і пневматичні машини" / В. К. Буслов. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – 80 с.
- [37] Захаркін О.У. Технологічні основи машинобудування: навчально-методичний посібник/О.У. Захаркін.– Суми: Вид-во СумДУ, 2004. – 98 с.

- [38] Основи технології машинобудування / І. Назаренко, А.Т.Свідерський, Р.І. Рибалко, О.П.Дєдов / Навчальний посібник. Київ, КНУБА, 2010. – 165 с.
- [39] Каталог Festo. пневматичний циліндр CRHD-32 і розподільчий клапан VUVS-25-S. Режим доступу до ресурсу: https://www.festo.com/net/en_corp/SupportPortal/default.aspx?cat=1633
- [40] Каталог. Прямокутний нагрівач Вентс НК. Режим доступу до ресурсу: <https://vents-shop.com.ua/pryamougolnyy-nagrevatel-vents-nk-400h200-6-3-u-s-blokom-upravleniya/?srsltid=AfmBOopvois-qr-IBmwwuB-G86A2LhCt5TQGgwxt03UyMxVEgFMP9GsL>
- [41] Вілліц, Д.Х. Охолодження теплиць з вентиляторною вентиляцією: Моделююче дослідження. Biosyst. Eng. 2003, 84, 315-329.
- [42] Розрахунок кута розпилення форсунок та покриття - Розпилювальна насадка HONGFENG, Китайський завод, постачальник, виробник. Розпилювальна насадка HONGFENG, Китайський завод, постачальник, виробник - Форсунки, пістолети-розпилювачі, обладнання для штучного туману. URL: <https://hfspray.com/uk/10319.html> (дата звернення: 14.10.2024).
- [43] Дипломний проєкт. Автоматизована гідравлічна система поливу та зрошування тепличного господарства. Гульков К., НТУУ «КІЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. І. СІКОРСЬКОГО», Київ, 2024 р.
- [44] Каталог. Електромагнітний клапан для поливу (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: <https://poliv-service.kiev.ua/ua/p1333542411-elektromagnitnyj-klapan-dlya.html>
- [45] Каталог. Регулятор витрати РПМ-102 Салео-Гомель (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: <https://hydrolider.com.ua/ua/p660927991-regulyator-rashoda-rpm.html>
- [46] Каталог. Дисковий промивний фільтр Saleplas 1" механічного очищення (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: https://formulavody.com.ua/uk/diskovyj-promyvnoj-filtr-mehanicheskoy-ochistki-saleplas-ispnija-1?utm_medium=tovarka-prosta&utm_source=prosta-tovarka&utm_campaign=prostaaja-torgovaja-

rk&gclid=Cj0KCQjwu8uyBhC6ARIsAKwBGpTHbneLPakQiLvX74hBbsv5MGdf4oZ7JvmBmL6BkLRluuORG7178cYaAtHQEALw_wcB

[47] Каталог. Насос Comet MP30 (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.uvc.com.ua/product/nasos-comet-mp30-s-flanczem-y-shkyvom-d247/>

[48] Каталог. Редукційні клапани з нержавіючої сталі, з різьбовими з'єднаннями (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: <https://www.goetze-group.com/en/buildings/products/pressure-reducing-valves-for-drinking-water-applications/481-s22787.html>

[49] Каталог. Промивний фільтр Resideo (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: https://vodavdom.ua/Product/742?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwu8uyBhC6ARIsAKwBGpTYnDwwRNqs9nAcJBSY1xI4l1EAn5robGl_6sm0ryrvvZTn2owqSsoaAl86EALw_wcB

[50] Каталог. Електромагнітний клапан для поливу (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: <https://poliv-service.kiev.ua/ua/p1333542411-elektromagnitnyj-klapan-dlya.html>

[51] Каталог. Електромагнітний клапан ACL (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу: https://nasosvdom.com.ua/uk/elektromagnitni-klapani/elektromagnitnij-klapan-acl-e107eb18-du20-t2617?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwgdayBhBQEiwAXhMxtrdzARiwErRBA8f-TTl5b6RSJeE6MkUAUqlqERHREWM0RHIgCn8e9txoC2P0QAvD_BwE

[52] Каталог. Форсунка UltiMist (електронний ресурс) – Режим доступу до ресурсу: https://bete.com/wp-content/uploads/2022/01/BETE_UltiMist.pdf

[53] Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління, Л.Г. Віхрова, проф., канд. тех. наук, В.М. Каліч, проф., канд. тех. наук, Т.О. Прокопенко, асист., Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2011, випуск 24, ч.ІІ

[54] On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat, Ahmed M. Abdel-Ghany *, Toyoki Kozai, Laboratory of Environmental Control Engineering, Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo Chiba 271-8510, Japan Received 30 April 2005; accepted 15 October 2005

[55] 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers, Keesung Kima, Jeong-Yeol Yoona, Hyuck-Jin Kwonb, Jin-Hee Hana, Jung Eek Sonc, Sang-Woon Namd, Gene A. Giacomellia, In-Bok Leeb a Department of Agricultural and Biosystems Engineering, The University of Arizona, Tucson, AZ 85721-0038, USA

[56] Синицина Є., & Губарев О., «ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ФОРСУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ В ТЕПЛИЧНОМУ ОБ'ЄКТІ» - IV Міжнародна наукова конференція «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень», ст. 196, 18.10.2024; Вінниця, України, <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/18.10.2024/19>

[57] Analysis of Heat and Humidity in Single-Slope Greenhouses with Natural Ventilation Huang Li, Angui Li *, Yicun Hou, Chi Zhang, Jinnan Guo, Jiaxing Li, Yuanqing Ma, Tianqi Wang and Yifei Yin School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China, 2023

[58] Analysis of the Effect of Exhaust Configuration and Shape Parameters of Ventilation Windows on Microclimate in Round Arch Solar Greenhouse. Zilong Fan, Yiming Li, Lingling Jiang, Lu Wang, Tianlai Li and Xingan Liu 1. Sustainability 2023, 15, 6432.

[59] American Society of Agricultural Engineers (ASAE). ASAE Standards 2003: ANSI/ASAE EP406.4 JAN03 Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. Available online: http://ceac.arizona.edu/sites/default/files/asae_-_heating_ventilating_and_cooling_greenhouses.pdf (accessed on 7 May 2020).

- [60] Subin, M.C.; Karthikeyan, R.; Periasamy, C.; Sozharajan, B. Verification of the greenhouse roof-covering-material selection using the finite element method. *Mater. Today Proc.* 2020, 21, 357–366. [CrossRef]
- [61] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). The Status of Vegetable Greenhouse Facilities and Vegetables Production in 2018; MAFRA: Sejong, Korea, 2019. Available online: <http://library.mafra.go.kr/skyblueimage/12716.pdf> (accessed on 7 May 2020).
- [62] Ahamed, M.S.; Guo, H.; Tanino, K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosyst.Eng.* 2019, 178, 9–33. [CrossRef]
- [63] I. Ioslovich, P. Gutman and R. Linker, “Hamilton-Jacobi-Bellman formalism for optimal climate control of green-house crop,” *Automatica*, No. 45(5), 2009, pp. 1227–1231, doi: 10.1016/j.automatica.2008.12.024.
- [64] N. Katsoulas, C. Kittas, I. L. Tsirogiannis, E. Kitta and D. Savvas, “Greenhouse microclimate and soilless pepper crop production and quality as affected fog evaporative cooling system,” *Transaction of ASABE*, 50, pp. 1831–1840, 2007, doi: 10.13031/2013.23947.
- [65] G. Papadakis, A. Frangoudakis and S. Kyritsis, “Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover”, *J Agric Engng Res.*, Vol. 51, pp. 191–205, 1992, doi: 10.1016/0021-8634(92)80037-S.
- [66] Sebastian-Camilo Vanegas-Ayala , Julio Baro’n-Velandia and Daniel-David Leal-Lara, A Systematic Review of Greenhouse Humidity Prediction and Control Models Using Fuzzy Inference Systems, *Advances in Human-Computer Interaction* Volume 2022, Article ID 8483003, 16 pages <https://doi.org/10.1155/2022/8483003>
- [67] G. Tong, D. M. Christopher and B. Li, “Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse,” *Comput. Electron. Agric.*, No. 68, pp. 129–139, 2009, doi: 10.1016/j.compag.2009.05.004.
- [68] M. A. Lamrani, T. Boulard, J.C. Roy and A. Jaffrin, “Airflows and temperature patterns induced in a confined greenhouse,” *J Agric Engng Res*, No. 78(1), pp. 75–88, 2001, doi: 10.1006/jaer.2000.0568.

- [69] R. Leyva, C. Constán-Aguilar, E. Sánchez-Rodríguez, M. Romero-Gámez and T. Soriano, “Cooling systems in screenhouses: Effect on microclimate, productivity and plant response in a tomato crop,” *Biosyst. Eng.*, No. 129, pp. 100–111, 2015.
- [70] S. Wang, T. Boulard, R. Haxaire, “Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop,” *Agric. For. Meteorol.*, No. 96, pp. 181–188, 1999, doi: 10.1016/S0168-1923(99)00063-5.
- [71] N. Choab, A. Allouhi, A. El, T. Kousksou, S. Saadeddine and A. Jamil, “Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies,” *Sol. Energy.*, Vol. 191, pp. 109–137, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.042.
- [72] Meteorological station (2023, May 26). Available: <https://meteopost.com/weather/archive/>
- [73] Microclimate Control in Greenhouses, Nemanja Radojević, Danka Kostadinović Faculty of Mechanical Engineering, December 2012, Accepted: February 2014, Milan, Italy.
- [74] Micro Climate Control in Greenhouse, D.T. Santosh*, K.N. Tiwari, Vikas Kumar Singh and A. Raja Gopala Reddy, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* Volume 6 Number 3 (2017) pp. 1730-1742.
- [75] Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse, Edwin Andrés Villagrán, Rodrigo Gil, *Agronomía Colombiana* 30(2), 282-288, 2012.
- [76] Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review Redmond Ramin Shamshiri, James W. Jones, *Int. Agrophys.*, 2018, 32, 287-302.
- [77] PREDICTION OF GREENHOUSE MICRO-CLIMATE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK SINGH, V. K., TIWARI, K. N., *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH* 15(1):767-778.
- [78] The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses

during summer and winter seasons Ke-shi He, Da-yue Chen, Li-juan Sun, Zheng-lu Liu & Zhen-yu Huang, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015 Vol. 9, No. 1, 399–410

[79] Effects of Three Cooling Systems on the Microclimate of a Greenhouse with a Pepper Crop in the Mediterranean Area, J. C. Gázquez, J.C. López, J. J. Pérez-Parra, E. Baeza.

[80] Microclimate Prediction for Dynamic Greenhouse Climate Control, Oliver Körner, HORTSCIENCE 42(2):272–279. 2007

[81] Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review, G Li¹, L Tang¹, X Zhang², J Dong¹ and M Xiao¹ Department of Architecture and Built Environment, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo, China

[82] On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer, T. Kozai, September 2006 Energy Conversion and Management 47(15):2612-2628, DOI:10.1016/j.enconman.2005.10.024

[83] MAXIMUM TEMPERATURE IN AN IDEAL GREENHOUSE O. Ivashtenko V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine, East Eur. J. Phys. Vol.4 No.2 (2017) 78-85

[84] 24-hour greenhouse temperature prediction model based on the weather forecast Wang-Jun^{1,a}, Yu-Haiye^{1,a} College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

[85] Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance Hyung-Kweon Kim ¹ , Si-Young Lee ¹ , Jin-Kyung Kwon ¹ and Yong-Hyeon Kim Agronomy 2022, 12, 143. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010143>

References

[86] Iddio, E.; Wang, L.; Thomas, Y.; McMorrow, G.; Denzer, A. Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2020, 117, 109480. [CrossRef]

- [87]. Microclimate Prediction for Dynamic Greenhouse Climate Control Oliver Kořner¹, Jesper Mazanti Aaslyng, and Andrea Utoft Andreassen Department of Agricultural Sciences, Crop Science, University of Copenhagen, Højbakkegaard Allée 21, 2630 Taastrup, Denmark
- [88] Lv, C.; Xing, Y.; Zhang, J.; Na, X.; Li, Y.; Liu, T.; Cao, D.; Wang, F.Y. Levenberg–Marquardt Backpropagation Training of Multilayer Neural Networks for State Estimation of a Safety-Critical Cyber-Physical System. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2018, 14, 3436–3446. [CrossRef]
- [89]. Baneshi, M.; Gonome, H.; Maruyama, S. Wide-range spectral measurement of radiative properties of commercial greenhouse covering plastics and their impacts into the energy management in a greenhouse. *Energy* 2020, 210, 118535. [CrossRef] *Agronomy* 2022, 12, 143 15 of 15
- [90] N.Momirović, B. Vasić, D. Raičević and M. Oljača, “Technical systems for microclimate control in greenhouses,” *Agricultural Engineering*, Faculty of Agriculture, Universities in Belgrade, Institute of Agricultural Engineering, No.4, 2007.
- [91] Effect of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants, *Pest Management Science*, Dieter Foqué, David Nuyttens, February 2011 67(2):199-208 DOI:10.1002/ps.2051
- [92] Giuseppina Nicolosi, Roberto Volpe and Antonio Messineo An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse *Energies* 2017, 10, 722; doi:10.3390/en10050722.
- [93] SINGH, V. K.* – TIWARI, K. N. PREDICTION OF GREENHOUSE MICRO-CLIMATE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH 15(1):767-778.
- [94] Mathematical and computer modeling of temperature distribution in a greenhouse for the development of a control system. L.G.Vikhrova, prof., Candidate of Technical Sciences, V.M.Kalich, prof., Candidate of Technical Sciences, T.O.Prokopenko, assistant, 2011

- [95] Nachidi, M. Stabilization of T-S Fuzzy Systems with Application on a Greenhouse: Static Output-Feedback Control Design Problem; Lap Lambert Academic Publishing GmbH KG: Saarbrücken, Germany, 2012. Available online: <https://books.google.lu/books?id=-VWHMgEACAAJ> (accessed on 15 March 2017).
- [96] Zhang, D.; Wu, X.; Zhang, C. The application of fuzzy control in greenhouse environment control. Appl. Mech. Mater. 2014, 543–547, 1432–1435. [CrossRef]
- [97] Синицина Є., & Губарев О. «Прогнозування температури в тепличних об'єктах» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2021 <http://imm-mmi.kpi.ua/proc> - ст. 222-225, 2021 рік.
- [98] Синицина Є., & Губарев О. Технічна конференція XXI МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» з темою «АДАПТИВНА ГІДРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА МІКРОКЛІМАТУ АВТОНОМНОГО ТЕПЛИЧНОГО ОБ'ЄКТУ» http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/2020/Program_2020.pdf - ст.21, №5, 2020 рік.
- [99] Синицина Є., & Губарев О. «Особенности вентиляции тепличных объектов» Єлизавета Юріївна Синицина, Олександр Павлович Губарев, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” <http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24536>
- [100] Синицина Є., & Губарев О.. Забезпечення вхідними даними смарт системи мікроклімату телиці малої площі, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” <http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24532>
- [101] Синицина Є., & Губарев О., Вплив матеріалів на регулювання температурного режиму тепличного об'єкту. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА, <https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>, 2022р.

- [102] Синицина Є., & Губарев О., Моделюванню процесів тепло - та масообміну в тепличному об'єкті. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА <https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>
- [103] Синицина Є., & Губарев О., «Гідропневматична смарт-система об'єкта тепличного господарства малого та середнього об'єму», Міжнародна науково-технічна конференція - ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ- <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023>
- [104] Синицина Є., & Губарев О., «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2024, <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30513>
- [105] Синицина Є., & Губарев О., «ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ФОРСУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ В ТЕПЛИЧНОМУ ОБ'ЄКТІ» - IV Міжнародна наукова конференція «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень», ст. 196, 18.10.2024; Вінниця, України, <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/18.10.2024/19>

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

- **Синицина Є., & Губарев О. (2023).** «Модель об'єкту керування мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму» - *Mech. Adv. Technol.* Vol. 7, No. 3, 2023, pp. 330–336. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.290773 (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Космина С.. (2024).** «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - *Mech. Adv. Technol.* 8, вип. 2(101), с. 164–171, Чер 2024. DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).298506_ (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Губарев О. (2024).** «МЕХАТРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ» - Вісник машинобудування та транспорту, 2024 рік, <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/20> (Стаття, Фахове видання України)
- **Синицина Є., & Губарев О.** «Прогнозування температури в тепличних об'єктах» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2021 <http://imm-mmi.kpi.ua/proc> - ст. 222-225, 2021 рік.
- **Синицина Є., & Губарев О.** Технічна конференція XXI МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» з темою «АДАПТИВНА ГІДРОПНЕВМАТИЧНА СИСТЕМА МІКРОКЛІМАТУ АВТОНОМНОГО ТЕПЛИЧНОГО ОБ'ЄКТУ» http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/2020/Program_2020.pdf - ст.21, №5, 2020 рік.
- **Синицина Є., & Губарев О.** «Особливості вентиляції тепличних об'єктів» Єлизавета Юріївна Синицина, Олександр Павлович Губарев, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” <http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24536>

- **Синицина Є., & Губарев О..** Забезпечення вхідними даними смарт системи мікроклімату телиці малої площі, XXVI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”
<http://conf.pgm.kpi.ua/2021/paper/view/24532>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** Вплив матеріалів на регулювання температурного режиму тепличного об’єкту. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА,
<https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>, 2022р.
- **Синицина Є., & Губарев О.,** Моделюванню процесів тепло - та масообміну в тепличному об’єкті. - XXIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП ПРОМИСЛОВА ГІДРАВЛІКА І ПНЕВМАТИКА
<https://pgm.sumdu.edu.ua/uk/novyny/171-khkhiii-mizhnarodna-naukovo-tekhnichna-konferentsiia-pid-ehidoiu-as-php-promyslova-hidravlika-i-pnevmatyka.html>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «Гідропневматична смарт-система об’єкта тепличного господарства малого та середнього об’єму», Міжнародна науково-технічна конференція - ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ_
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023/paper/view/18239>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «Мехатронна система керування температурою мікроклімату теплиці» - МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ, Інновації молоді в машинобудуванні, 2024 <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30513>
- **Синицина Є., & Губарев О.,** «ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ФОРСУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ В ТЕПЛИЧНОМУ ОБ’ЄКТІ» - IV Міжнародна наукова конференція «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень», ст. 196, 18.10.2024; Вінниця, України,
<https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/18.10.2024/19>

ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОНАЧИХ ПРІСТРОЇВ

Valve series VS: VUVS/VUWS/VTUS

Valve series in detail

The product series: VUVS: choose and combine

Solenoid valve		VUVS-...-5			VUVS-...			Valve manifold VTUS			Pneumatic valve VUWS-...		
													
		Focused features – Festo quality – attractive price											
Technical data													
Part of the core product range Our recommendation: Look for the star		★											
Valve width [mm]		20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Valve function		3/2, 5/2			5/2, 5/3, 3/2								
Flow rate [l/min]		550	1000	1600	700	1300	2000	700	1200	2000			
Connections	Pneumatic	G1/8	G1/4	G3/8	G1/8, NPT1/8	G1/4, NPT1/4	G3/8, NPT1/8, NPT3/8	G1/8, NPT1/8	G1/4, NPT1/4	G3/8, NPT1/8, NPT3/8			
	Electric	Type C EN 175301	Type B2 EN 175301		Type C EN 175301	Type C or B2 EN 175301	Type C or B2 EN 175301	–					
Pressure range [bar]		2 ... 8			0 ... 10			2.5 ... 10 for pilot actuated valves (internal pilot air)					
Temperature range [°C]		–5 ... +50			–10 ... +60								
Voltage [V DC]		24			12, 24, 48			–					
Voltage [V AC]		–			24, 48, 110/120, 230/240			–					
Degree of protection		IP65			IP65, IP67								



Diverse range of accessories for quick, clean mounting of the individual valve VUVS, e.g. via mounting brackets or mounting plates.



Pneumatic fittings suitable for metal tubes, providing protection against mechanical damage, even at higher ambient temperatures



Cap for changing manual override to "pushing, non-detenting" or "covered"



Captive screws prevent damage or loss during valve changes



Valve can be quickly attached to the manifold rail with just 2 screws. The manifold rail can be extended by two positions at a time

★ **Festo core product range**
covers 80% of your
automation tasks

Worldwide: always in stock
Superb: Festo quality at an attractive price
Easy: just a few clicks to place an order online
Fast: generally ready for dispatch from the Festo factory in 24 hours

www.festo.com

PSI 260.1 135/56 en 2018/03 – Errors and omissions excepted

Datasheet

General technical data						
Piston diameter	32 mm	40 mm	50 mm	63 mm	80 mm	100 mm
Stroke	10 ... 500 mm					
Pneumatic connection	G1/8		G1/4	G3/8		
Piston rod thread type ¹⁾	Male thread					
Design	Piston Piston rod					
Cushioning	Pneumatic cushioning, adjustable at both ends					
Cushioning length	17 mm	19.5 mm	21 mm	31 mm		
Position detection	Via proximity switch					
Mounting position	optional					

1) Piston rod thread:

Ø 32: M16x1.25

Ø 40: M12x1.25

Ø 50, 63: M16x1.5

Ø 80, 100: M20x1.5

Operating and environmental conditions

Temperature range	Standard	Heat-resistant seals max. 120°C
Operating medium	Compressed air to ISO 8573-1:2010 [7:4:4]	
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (in which case lubricated operation will always be required)	
Operating pressure	1 ... 10 bar	
Ambient temperature ¹⁾	-20 ... 80°C	
Suitable for use with food ²⁾	See supplementary material information	
Corrosion resistance class	3 - high corrosion stress	
CRC ³⁾		

1) Note the operating range of the proximity switches.

2) CRHD ... S6: Not suitable for direct contact with food products because of the seals and the grease used.

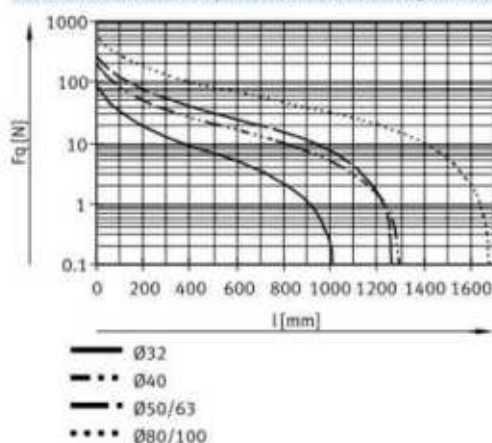
More information: www.festo.com/en/Certificates

3) Outdoor exposure under moderate climatic conditions. External visible parts with primarily functional surface requirements that are in direct contact with the surrounding industrial environment.

More information: www.festo.com/en/topic/crc

Forces

Piston diameter	32 mm	40 mm	50 mm	63 mm	80 mm	100 mm
Theoretical force at 0.6 MPa (6 bar, 87 psi), advance stroke	483 N	754 N	1,178 N	1,870 N	3,016 N	4,712 N
Theoretical force at 0.6 MPa (6 bar, 87 psi), return stroke	415 N	633 N	990 N	1,682 N	2,721 N	4,418 N

Permissible lateral force F_q as a function of stroke length l – horizontal mounting



(UM) Misting Nozzles



Plastic Nozzle



Metal

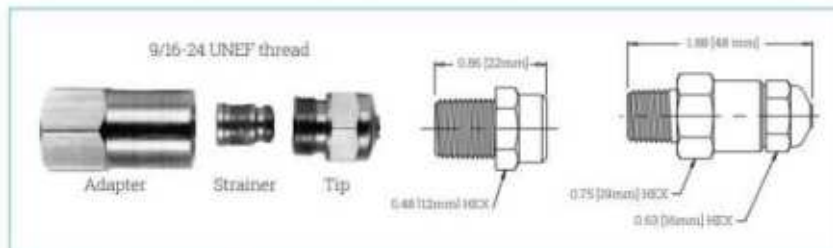
DESIGN FEATURES

- Very fine, fog-like mist
- Produces a high number of droplets under 60 microns
- Includes integrated check valve to prevent dripping
- Metal nozzle includes integral 100 mesh strainer

SPRAY CHARACTERISTICS

- Medium angle, hollow cone pattern

Flow rates: 0.37 to 16.4 GPH (Metal),
0.63 to 8.5 GPH (Plastic)



Drawing dimensions listed are within a tolerance +/- 1/32"

MISTING

ULTIMIST® METAL FLOW RATES & DIMENSIONS

Materials: 416 Stainless Steel Tip, Brass Adapter/Body

Male or Female Connection Type	Nozzle Number	K Factor	Flow Rate (GPH) @ Differential Pressure (psi)				
			40	100	500	1000	1200
			psi	psi	psi	psi	psi
1/8" or 1/4" NPT, BSP	UM37M	0.06	0.37	0.59	1.30	1.90	2.00
	UM50M	0.08	0.50	0.79	1.80	2.50	2.70
	UM75M	0.12	0.75	1.20	2.70	3.80	4.10
	UM100M	0.13	1.00	1.60	3.50	5.00	5.50
	UM150M	0.24	1.50	2.40	5.30	7.50	8.20
	UM200M	0.32	2.00	3.20	7.10	10.0	11.0
	UM250M	0.40	2.50	4.00	8.80	12.5	13.7
	UM300M	0.47	3.00	4.70	10.6	15.0	16.4

ULTIMIST® PLASTIC FLOW RATES & DIMENSIONS

Materials: Polyacetal

Male Connection Type	Nozzle Number	K Factor	Flow Rate (GPH) @ Differential Pressure (psi)				
			40	60	100	200	1000
			psi	psi	psi	psi	psi
1/8" NPT, BSP	UML63M	0.10	0.63	0.77	1.00	1.40	3.20
	UML126M	0.20	1.30	1.50	2.00	2.80	6.30
	UML170M	0.27	1.70	2.10	2.70	3.60	8.90

Flow Rate (GPM) = $K \sqrt{P}$

Spray angle performance varies with pressure. Contact BETE for specific data on critical applications.