

Олександр Губарев

Доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
03056, пр-т Берестейський, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>

Єлизавета Синицина*

Аспірант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
03056, пр-т Берестейський, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-7361-0031>

Мехатронна система керування вологістю мікроклімату теплиці

Анотація. Проаналізовано вплив загальних параметрів температури і вологості на мікроклімат малих теплиць. Визначено основні властивості, що забезпечують найбільш сприятливі умови для росту і розвитку рослин, серед яких значну роль відіграє вологість повітря. Для забезпечення стабільного режиму повітря всередині тепличного приміщення необхідно підтримувати баланс вологості. Метою роботи є створення мехатронної системи керування вологістю повітря в тепличному господарстві. Особливістю підходу є зміщений алгоритм керування розпилювачами на основі щоденного прогнозу погоди. Обґрунтовано та розроблено комп'ютерну модель тепличного комплексу, яка враховує додаткову компенсацію водяної пари, конвекцію та вимушений рух повітряних мас у теплиці. За результатами досліджень розроблено математичну модель зміни витрати водяної пари в теплиці відповідно до зміни вологості зовнішнього повітря протягом доби в програмному середовищі SOLIDWORKS. Проведено моделювання зміни параметрів повітря в теплиці протягом однієї доби для прогнозу погоди в Херсонській області (17 травня 2023 року). В основу моделювання було покладено проектні параметри теплиці, початкову температуру в теплиці 20 °С, температуру навколишнього середовища в діапазоні від 13,9 °С до 26,2 °С згідно з прогнозом погоди та початкову вологість повітря 70 %. Встановлено, що отримані характеристики дозволяють оцінити загальний коефіцієнт насичення повітря водяною парою, що послужило основою для визначення необхідної продуктивності компенсуючих інжекторів і розробки циклограми керування системою стабілізації вологості повітря в теплиці. Для забезпечення стабільної вологості в теплиці розроблена мехатронна гідравлічна система туманоутворення. За результатами модельного експерименту визначено координати розташування інжекторів та розроблено режим їх роботи, а саме алгоритм керування. Результати дослідження та розроблений алгоритм керування придатні для використання в мехатронних системах керування мікрокліматом з урахуванням добових змін параметрів навколишнього середовища. В алгоритмі передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплексу команд керування. Логіка процесу керування базується на визначенні і відпрацюванні режимів в трьох діапазонах вологості: 70–65 %; 65–60 %; 60–50 %

Ключові слова: мехатронна система; гідравлічна система; система керування; мікроклімат; вологість; розпилення; теплиця

Suggested Citation:

Hubarev, O., & Synytsyna, Ye. (2024). Mechatronic system for controlling the humidity of the greenhouse microclimate. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 38-47. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.38.

*Corresponding author



Вступ

Зміна характеру клімату навколишнього середовища викликає суттєву зміну параметрів мікроклімату теплиці впродовж всього експлуатаційного часу [9, 12]. Вологість повітря можна регулювати за допомогою температури повітря та системи туманоутворення [2, 5]. Зміна кількості водяної пари в 1 м^3 об'єму відбувається за рахунок масообміну повітря з навколишнім середовищем тепличного об'єкту. У теплий період року стабільність рівня вологості повітря підтримують за допомогою провітрювання та системи туманоутворення, а в холодний період року підтримка рівня вологості повітря відбувається за рахунок системи рециркуляції [10, 11].

Система керування мікрокліматом тепличного об'єкта має відслідковувати зміни параметрів мікроклімату зовнішнього середовища та, відповідно до цих змін, реагувати та змінювати налаштовані параметри внутрішнього середовища теплиці, підтримуючи сталу температуру та вологість повітря в замкненому об'ємі тепличного об'єкту [1]. Мехатронна система керування мікрокліматом теплиці має враховувати чотири основні чинники, які забезпечують термодинамічний обмін: конструктив теплиці, повітря в замкненому об'ємі теплиці, ґрунт та рослини. Кожен чинник відповідає за наступне: конструкція тепличного об'єкту втримує тепло; повітря всередині теплиці регулює температуру та вологість (тепло-масообмін); ґрунт поглинає вологу та теплове випромінювання; рослини додають фотосинтез та викривлення потоків повітря [2]. Для забезпечення сталої роботи системи необхідний постійний контроль параметрів фізичного середовища теплиці, оскільки надмірна вологість повітря може спричинити захворювання рослин, а недостатня вологість може викликати гідралічний стрес, що у будь-якому випадку знижує рівень продуктивності тепличного об'єкту [2, 4].

У даній роботі запропонована мехатронна система керування вологістю на основі конструкції тепличного об'єкту та термодинамічних процесів всередині замкнутого об'єму, з врахуванням параметрів оточуючого середовища і початкової вологості повітря в середині теплиці.

При аналізі літературних даних було виявлено, що більшість досліджень зосереджені на застосуванні технології, спрямованих на створення мікроклімату в одній теплиці з певним тестовим середовищем [3]. В іншому прикладі використовують різну структуру та управління тепличного об'єкту [4]. К. Кітас та Т. Барцанас [5] виявили, що дані CFD моделювання вказують на різні розподіли швидкості повітря та вологості в тепличному об'єкті. В дослідженні системи сонячного опалення та кліматизації теплиць [6] автори використовували лише дані про температуру та відносну вологість без врахування ситуації з відкриванням вікон провітрювання. У роботі С.-К. Ванегас-Аяла, Х. Баронь-Веландія та Д.-Д. Леаль-Лара [11] розглянуто прогнозування вологості в тепличному об'єкті,

визначено базову структуру середовища (Рис. 1а). 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 виведення (Рис. 1б). 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, CO_2 та туманоутворення), їх взаємодія визначається нечіткими правилами, а на виході нечіткої системи отримується значення внутрішньої вологості.

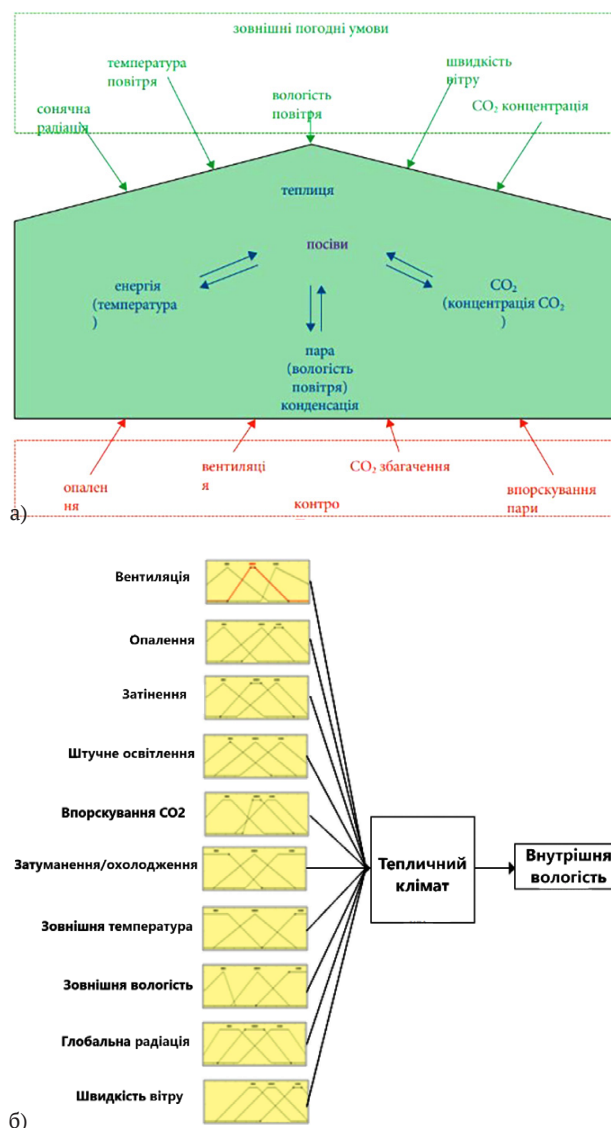


Рисунок 1. Прогнозування та контроль вологості в теплиці

Примітки: а – схема моделі парникового клімату; б – блок-схема системи нечіткого виведення

Джерело: [11]

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 [3–6] та результатів досліджень встановлено, що для забезпечення сталого режиму вологості повітря в середині тепличного об'єкту необхідно передбачити мехатронну систему керування вологістю. Таким чином в системі забезпечуватиметься вологість, що є невід'ємною частиною системи мікроклімату. Для забезпечення рівномірного розподілу вологості та необхідної її кількості потрібно зберігати баланс вологості в середині теплиці. Для реалізації вказаного підходу необхідно розробити систему туманоутворення.

Метою цієї роботи є створення мехатронної системи керування вологістю повітря тепличного об'єкту. Для цього необхідно провести аналіз добової вологості повітря навколишнього середовища та її вплив на тепличний об'єкт з заданими сталими параметрами мікроклімату. Наступним етапом буде розробка моделі теплиці та моделювання зміни вологості повітря впродовж однієї доби [7]. За отриманими результатами необхідно визначити кількість водяної пари для підтримки балансу вологості повітря в середині теплиці, розробити гідравлічну схему системи туманоутворення, підібрати форсунки та розробити алгоритм керування форсунками.

Матеріали та методи

Система керування форсунками системи туманоутворення, приводами вікон провітрювання та зашторювання, приводами заслінок каналів, вентиляторами та нагрівачами повинна підтримувати сталу температуру та вологість повітря в середині теплиці незалежно від впливу зовнішніх факторів. Для створення мехатронної системи керування вологістю необхідно врахувати залежності змін витрати водяної пари для підтримки балансу вологості теплиці у часі під впливом прогнозованих змін параметрів оточуючого 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. На першому етапі, для створення моделі, було розглянуто процеси, що відбуваються в об'єкті керування, їх математичні описи і межі застосування, параметри та коефіцієнти, необхідні для розрахунків.

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

$$\Delta H = \Delta H_{air} - \Delta H_{plant}, \quad (1)$$

де ΔH – зміна пари всередині теплиці, ΔH_{air} – зміна

пари, спричинена вентиляцією, а ΔH_{plant} – зміна вологості за рахунок транспірації рослин, випаровування ґрунтової води та інших джерел вологості.

Розрахунок відносної вологості повітря за допомогою мікро-метеорологічної моделі забезпечено рівнянням (2) [8]:

$$RH = \frac{e_a}{e_w}, \quad (2)$$

де RH – відносна вологість, e_a – тиск пари, e_w – тиск насиченої пари при тій самій температурі.

Визначення абсолютної вологості наведено у рівнянні (3), при цьому значення e_a може бути представлено у вигляді рівняння (4):

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

$$e_a = \rho_v \cdot R_v \cdot T, \quad (4)$$

де ρ_v – маса пари на кубічний метр повітря (кг/м³), R_v – питома газова стала для водяної пари, що дорівнює 461,5, T – температура (°C).

Таким чином, узагальнений процес переносу водяної пари повітрям, може бути описаний за допомогою рівнянь (2)-(4), і матиме вигляд:

$$H = \frac{RH e_w}{R_v T - Q}, \quad (5)$$

де H – маса водяної пари, що переноситься повітрям, Q – об'єм повітря в теплиці.

Отже, у 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:

$$\Delta H_{air} = Q_{in} \times (AH_{outside} - AH_{inside}) = ((e_w Q_{in} RH_{outside}) / R_v T_{outside} - (RH_{inside} / R_v T_{inside})), \quad (6)$$

де $AH_{outside}$ – абсолютна вологість припливного повітря, AH_{inside} – абсолютна вологість припливного повітря в теплиці, $RH_{outside}$ – відносна вологість припливного повітря, RH_{inside} – відносна вологість повітря в теплиці, $T_{outside}$ – температура зовнішнього повітря, а T_{inside} – температура повітря в теплиці.

Для забезпечення балансу вологості в тепличному об'єкті малого об'єму необхідно врахувати 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:

$$Q_\phi \cdot T1 \cdot \Delta t1 = 60 \cdot v \cdot S \cdot T2 \cdot \varphi \cdot \Delta t2 = \varphi T, \quad (7)$$

де Q_ϕ – продуктивність форсунок, л/год; $T1$ – температура водяної пари, °C; $\Delta t1$ – час роботи форсунок, год; 60 – кратність повітрообміну для тепличного об'єкту; v – швидкість потоку припливного повітря; S – площа поперечного перерізу припливного повітропроводу, м²; $T2$ – температура припливного повітря, °C; φ –

вологість припливного повітря, %; Δt_2 – час роботи вентилятора, год; φ – задане початкове стале значення вологості в середині тепличного об'єкту (для даного дослідження φ прийнято 70 %).

Результати

Дослідження функціонування теплиці

Для визначення функцій тепло-масообміну з оточуючим середовищем в процесі функціонування теплиці було побудовано математичну модель в середовищі SOLIDWORKS [9]. Краєві умови. Прийнято, що модельне дослідження охоплює одну добу. Середовище тепличного об'єкту має початкову температуру 20°C, вологість – 70 %. З урахуванням зміни вологості повітря навколишнього середовища побудовано модель зміни витрати водяної пари теплиці впродовж доби. Для модельного дослідження вирішено прийняти вхідною змінною вологість повітря зовнішнього середовища. Процес дослідження мікроклімату тепличного об'єкту відбувається в безперервному часі. В моделі тепличного об'єкту забезпечується регулювання різниці водяної пари за допомогою форсунок (Рис. 2).

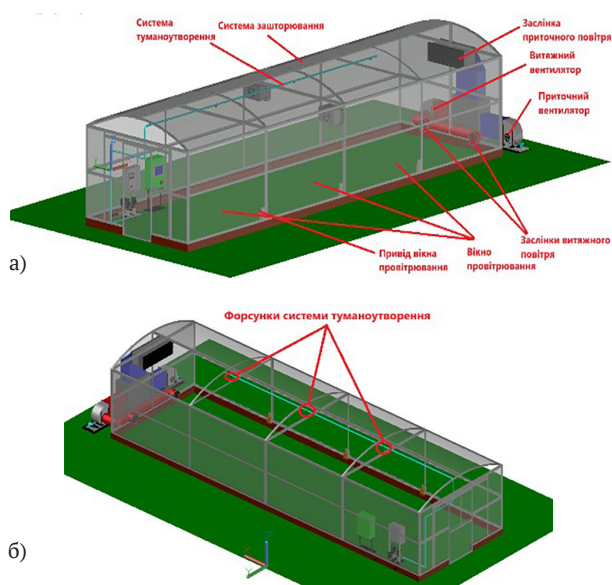


Рисунок 2. Зовнішній вигляд моделі тепличного об'єкта з мережею зволоження (а, б)

Джерело: створено авторами на основі [9, 12]

Для проведення тестового випробування моделі було сформовано масив даних відповідно до задачі та основних параметрів об'єкта дослідження. Введено наступні початкові дані [9]:

- 1 – початкове значення температури повітря всередині замкнутого об'єму теплиці 20°C;
- 2 – початкове значення вологості повітря всередині замкнутого об'єму теплиці 70 %;
- 3 – термін очікування стабілізації теплообмінних процесів від 20 хвилин до 3 годин.

В середовищі SOLIDWORKS генерується модель зміни параметрів мікроклімату (зміна температури та відносної вологості повітря, яке подається в тепличний об'єкт). Оскільки мехатронна система керування мікроклімату має забезпечувати постійне значення вологості повітря у всьому об'ємі теплиці, необхідно спрогнозувати очікувані зміни вологості повітря при зміні температури зовнішнього середовища. Для цього встановлено систему туманоутворення, яка буде підтримувати вологість повітря на необхідному рівні (Рис. 2). Тобто, на функції дослідження припадає задача визначення необхідної тривалості, кількості та продуктивності форсунок. Для цього, шляхом моделювання, визначено зміна вологості повітря в теплиці впродовж доби. Наступним кроком було проведено інтегрування площі продуктивності форсунок до середнього значення необхідної кількості водяної пари в замкнутому об'ємі теплиці. Це дозволило розрахувати втрати водяної пари впродовж доби. Оскільки об'єм теплиці становить 1 400 м³, а початкова температура в середині теплиці 20 °C і вологість 70 %, то за годину необхідна кількість водяної пари становитиме 18,16 л/год. Дана кількість водяної пари обумовлена підтримкою балансу вологості в теплиці. Водяна пара може надходити до тепличного об'єкту шляхом надходження повітряних мас через заслінку приточного повітря (Рис. 2а), або через розпилення форсунок (Рис. 2б). Керування приточним повітрям відбувається разом з керуванням температурою і має бути враховано в роботі форсунок [9, 12]. Надання вологи через форсунки передбачає необхідну витрату вологи та її розподіл по теплиці. В цьому випадку, окрім загальної витрати вологи, постає задача визначення кількості форсунок для розпилення та визначення їх розташування.

Визначення кількості форсунок базується на співвідношенні площі зволоження теплиці і діаметрі розпилення форсунки [10]:

$$D = 2Htg\frac{\alpha}{2}, \quad (8)$$

де H – висота розпилення; α – кут розпилення.

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

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} D. \quad (9)$$

Провівши розрахунки для даного типу теплиці з урахуванням кута розпилення (наприклад, 68° з характеристик форсунки) визначено, що діаметр розпилення однієї форсунки може складати 2,5 м [13]. Тобто для зволоження теплиці з площею зволоження 7х4 м для повного покриття поверхні достатньо 6 форсунок. Щоб забезпечити рівномірне розподілення водяної пари в замкнутому об'ємі запропоновано використовувати меншу кількість форсунок разом з примусовою рециркуляцією повітря. Для розглянутої теплиці достатньо

3 форсунки з продуктивністю 2,0 л/год., які працюватимуть в залежності від необхідної кількості компенсуючої водяної пари (Рис. 2б). Рівномірність розподілення водяної пари, в такому випадку, забезпечується циркуляцією повітря в середині теплиці.

Для забезпечення стабільної вологості в теплиці запропонована мехатронна гідравлічна система туманоутворення (Рис. 3а). Необхідну продуктивність і тиск води в системі зволоження забезпечує насосний агрегат з акумулятором, в якому передбачено фільтр для очищення води і клапани тиску, для запобігання перенавантаження і налаштування робочого тиску.

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.

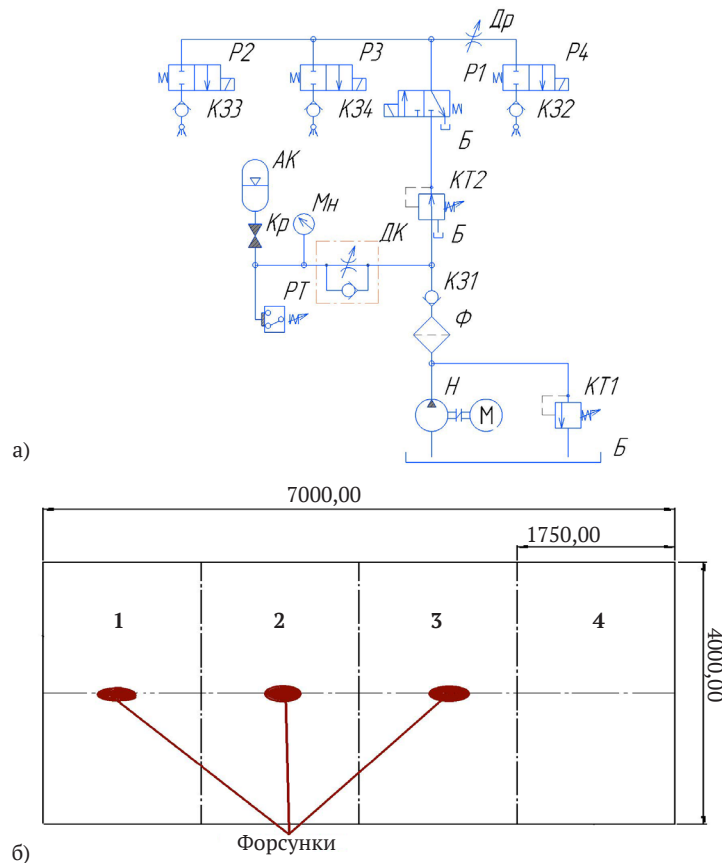


Рисунок 3. Мехатронна гідравлічна система туманоутворення

Примітки: а – гідравлічна схема системи туманоутворення; б – схема розміщення форсунок в тепличному об'єкті

Джерело: створено авторами

Згідно з розрахунком балансу вмісту вологи достатньо задіяти три форсунки з продуктивністю 2 л/год. та тиском 3 бар, 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. 3б).

Мета наступного етапу модельного дослідження полягає у визначенні кількості водяної пари, яку втрачає теплиця під час охолодження. Саме ця кількість має бути забезпечена системою туманоутворення і є вихідним показником для розрахунку термінів

вмикання форсунок і підтримання сталої вологості в середині теплиці. Дослідження виконані в SOLIDWORKS Simulation [12]. Задачею комп'ютерного моделювання є визначення параметрів роботи форсунок задля компенсації зовнішнього впливу на основі врахування зміни теплової потужності теплиці при її охолодженні.

Алгоритм керування підсистемою зволоження, в залежності від змін температури внутрішнього середовища теплиці і змін вологості, і температури доданого повітря, має компенсувати додану або від'ємну кількість водяної пари. Значення компенсуючої витрати водяної пари та час її додавання, для забезпечення необхідного рівня вологості, визначають режими роботи форсунок. Для визначення цих параметрів виконано моделювання зміни поля температури та вологості повітря в об'ємі теплиці на протязі доби і отримані залежності додаткової витрати водяної пари в часі.

Результати тестового експерименту

Для експерименту встановлено наступні початкові дані: повітрообмін тепличного об'єкту – 1 400 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 [7]. Вказані початкові значення температури і вологості дорівнюють стабілізованим значенням цих параметрів.

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).

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. 4а). Спостерігається накопичення водяної пари біля вікна провітрювання (зона 1), що свідчить про утворення точки роси через зниження температури на стінках теплиці (Рис. 4а).

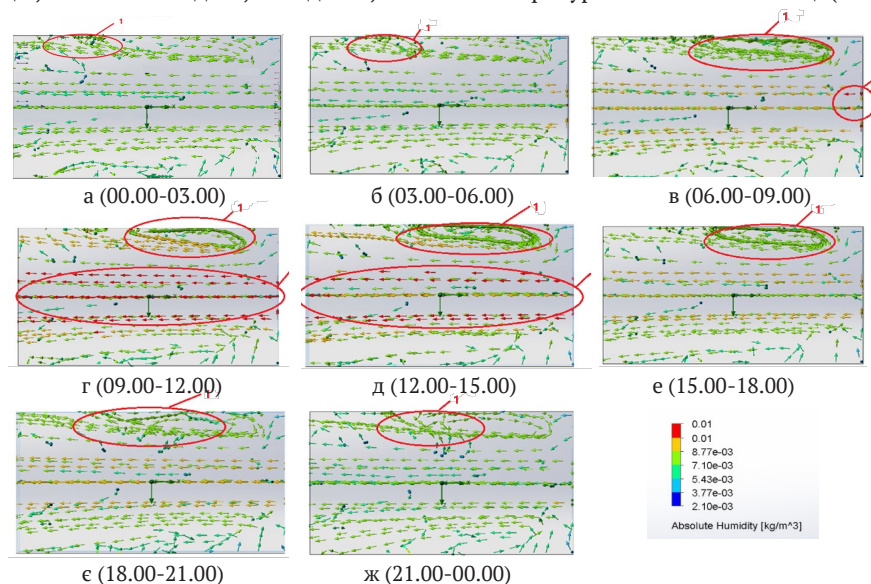


Рисунок 4. Епюра змін розподілу вологості повітря в перерізі теплиці впродовж доби

Примітки: 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 1 м³

Джерело: створено авторами

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. 4б, 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 продовжується накопичення водяної пари біля вікна провітрювання і зростання площі

зони 1 майже в 3 рази (Рис. 4в). 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 добавило 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. 4г).

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'єкту та біля вікна провітрювання у порівнянні з попереднім дослідженням (Рис. 4д). 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 підвищенні, 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 год. (Рис. 4е).

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 град. 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 град. Зона 2, як і в попередньому дослідженні, відсутня, а зона 1 наближується до вигляду, який вона мала на початковому стані експерименту (Рис. 4а).

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.

Отримані значення середньої витрати дозволило розрахувати втрату водяної пари теплиці на основі чого побудовано залежність для компенсації вологості повітря впродовж доби (Рис. 5а). Також було зроблено висновок, інтервал змін режиму зволоження має не перевищувати 3 годин зранку і ввечері, і може мати більше значення вдень і вночі.

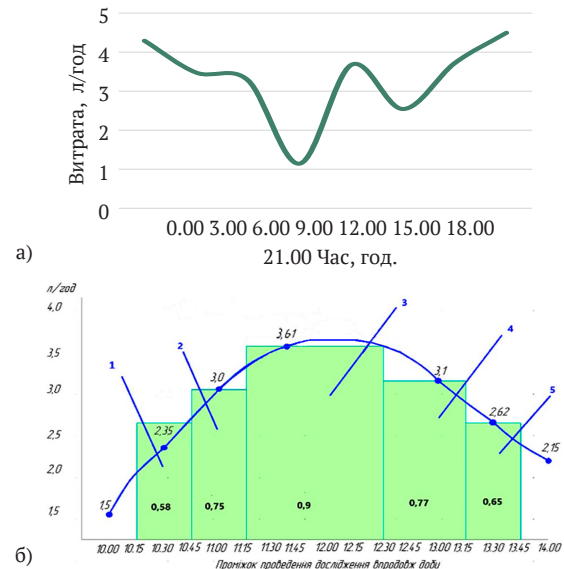


Рисунок 1. Втрати водяної пари теплиці

Примітки: а – залежність компенсації втраченої водяної пари в теплиці впродовж доби; б – прогнозована зміна втрати вологості повітря з циклограмою включення та вимкнення компенсуючих форсунок

Джерело: створено авторами

Для визначення режимів вмикання/вимикання форсунок було виконано розрахунок доданої витрати вологості на прикладі зміни параметрів повітря відповідно до добового прогнозу погоди [7]. За результатами розрахунку, для компенсації втрати вологості в тепличному об'ємі, запропоновано використати три форсунок продуктивністю 2 л/год. Місця встановлення форсунок обрано за характеристикою сталої осередненої витрати по площі зволоження (Рис. 3б).

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

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} K_d(t)dt = Q_N * \Delta t, \quad (8)$$

де t_0 – поточний час, K_d – функція добових витрат вологості відповідно результатів моделювання (Рис. 5б), Q_N – продуктивність форсунок, Δt – тривалість поточного вмикання форсунок.

В залежності від поточного і прогнозованого значення втраченої вологості повітря обираємо вмикання одної, двох або трьох форсунок (Рис. 5б). З побудованої циклограми видно, що для забезпечення компенсації втрат водяної пари необхідно вмикати дві форсунок

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 – 30 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря – 2,35 л/год. Отже, при сумарній продуктивності двох форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок (інтегральна скважність) становитиме 0,58, а реальний час роботи форсунок – 17,4 хв. (термін вимкнених форсунок – 12,6 хв.).

Другий режим: дві форсунки працюють з 10.45 по 11.15, тривалість режиму становить 30 хв. 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 становитиме 0,75, а час роботи форсунок – 22,5 хв. (стан спокою – 7,5 хв.).

Третій режим: дві форсунки працюють з 11.15 по 12.30, тривалість режиму – 75 хв. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря – 3,61 л/год. Тобто, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок становитиме 0,9, а час роботи форсунок – 67,5 хв. (стан спокою – 7,5 хв.).

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

П'ятий режим: дві форсунки працюють з 13.15 по 13.45, тривалість режиму – 30 хв. 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 становитиме 0,65, а реальний час роботи форсунок – 19,65 хв. (стан спокою – 10,35 хв.).

На основі розрахованих режимів роботи системи туманоутворення та результатів моделювання добових змін зволоження побудовано загальний алгоритм керування форсунками (Рис. 6). В алгоритмі передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплексу команд керування. В режимі налагоджування може здійснюватися корегування констант для випадку непередбачених змін параметрів зовнішнього 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). 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.

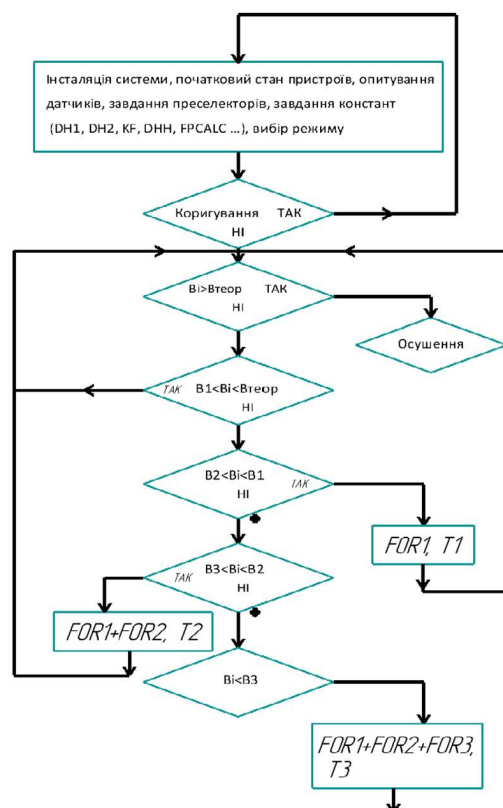


Рисунок 6. Загальний алгоритм програми керування форсунками

Джерело: створено авторами

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 $T1$. При вибігу часу $T1$ початкові дані замінюються на поточні, а поточні дані оновлюються. При потраплянні значень вологості в інтервал від $B2$ до $B3$, алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2) на час $T2$. При вибігу часу $T2$ початкові дані замінюються на поточні. При подальшому зниженні вологості нижче $B3$ алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2, та FOR3) на час $T3$. При вибігу часу $T3$ 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: Форсунок: 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 форсунок; 60–50 %: працюють три форсунок. 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, форсунок мають працювати поки не буде досягнуте середнє значення вологості у відповідному режимі. Коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,9. Отже, якщо загальний час роботи режиму складає 75 хв. (T_0), відповідно, час роботи форсунок $T_1 = 0,9 \cdot T_0$ і складає 67,5 хв. Так як $T_1 + T_2 = T_0$, то час спокою форсунок $T_2 = T_0 - T_1$ і буде становити 7,5 хв.

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

Відпрацювання команд керування форсунками наведено в фрагменті коду, що доповнений у відповідності з наведеною блок-схемою [12].

Висновки

У даній роботі обґрунтовано, розроблено та перевірено на правдоподібність мехатронну систему керування вологістю повітря мікроклімату теплиці середнього об'єму з використанням компенсуючих форсунок. Виконані тестові випробування моделі підтвердили її придатність для прогнозування змін вологості повітря при процесах тепло-масообміну під дією зовнішніх чинників. Встановлено, що з урахуванням тепло-масо-обмінних процесів в геометричній 3-D моделі теплиці можуть бути змодельовані зміни витрати водяної пари теплиці впродовж доби. Отримані залежності зниження концентрації вологості в повітрі дозволили побудувати циклограму роботи компенсуючих форсунок впродовж доби.

Отримана в результаті модельного експерименту залежність дефіциту вологості впродовж доби допомогла розрахувати функцію необхідної продуктивності компенсуючих форсунок у часі. 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. Відповідно до отриманої циклограми роботи форсунок був розроблений алгоритм керування елементами мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST).

Список використаної літератури

- [1] Mironenko, G.P., & Spaska, L.I. (2011). *Thermal calculation of a protected ground structure*. Kharkiv: KNAU.
- [2] Ganzhur, M., Ganzhur, A., Kobylko, A., & Fathi, D. (2020). Automation of microclimate in greenhouses. *E3S Web of Conferences*, 210, article number 05004. doi: 10.1051/e3sconf/202021005004.
- [3] Willits, D.H. (2003). Cooling fan-ventilated greenhouses: A modelling study. *Biosystems Engineering*, 84(3), 315-329. doi: 10.1016/S1537-5110(02)00270-2.
- [4] Ebbs, L., & Rao, S.A. (2018). Differential response of plant species to greenhouse microclimate created by design technology and ambient conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(2), 300-308. doi: 10.1139/cjps-2016-0419.
- [5] Kittas, K., & Bartsanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774-3784. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.020.
- [6] Tadili, R., & Dahman, A.S. (1997). Effects of a solar heating and climatization system on agricultural greenhouse microclimate. *Renewable Energy*, 1(4), 569-576. doi: 10.1016/S0960-1481(96)00036-5.
- [7] Meteopost. (n.d.). Retrieved from <https://meteopost.com/weather/archive>.
- [8] Gaudriaan, J., & Van Laar, H.H. (1994). *Modeling potential crop growth processes*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [9] Sinitsina, E.Yu. (2023). Model of the control object of the mechatronic microclimate system of a medium-sized greenhouse. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(3), 330-336. doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.290773.
- [10] Calculation of the spray angle of nozzles and coating – Spray nozzle HONGFENG, Chinese factory, supplier, manufacturer. Spray nozzle HONGFENG, Chinese factory, supplier, manufacturer – Nozzles, spray guns, equipment for artificial fog. (n.d.). Retrieved from <https://hfspray.com/uk/10319.html>.
- [11] Vanegas-Ayala, S.-C., Baro'n-Velandia, J., & Leal-Lara, D.-D. (2022). A systematic review of greenhouse humidity prediction and control models using fuzzy inference systems. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2022, article number 8483003. doi: 10.1155/2022/8483003.
- [12] Sinitsina, E.Yu., & Gubarev, O.P. (2024). Mechatronic system for controlling greenhouse microclimate temperature. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(2(101)), 164-171. doi: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).298506.

- [13] Sinitsina, E.Yu., Gubarev, O.P., & Gulkov, K.S. (2024). Research of a simplified model of a nozzle for providing humidity in a greenhouse. In *Proceedings of the ICSR conferences* (pp. 196-202). Vinnytsia: International Center for Scientific Research. [doi: 10.62731/mcnd-18.10.2024.004](https://doi.org/10.62731/mcnd-18.10.2024.004).

Hubarev Oleksandr

Doctor of Technical Sciences, Professor
The National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37 Beresteyskyi Ave., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>

Yelyzaveta Synytsyna

Postgraduate Student
The National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37 Beresteyskyi Ave., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-7361-0031>

Mechatronic system for controlling the humidity of the greenhouse microclimate

Abstract. The influence of general parameters of temperature and humidity on the microclimate of small greenhouses is analysed. The main properties that provide the most favorable conditions for plant growth and development are identified, among which air humidity plays a significant role. To ensure a stable humidity regime inside the greenhouse, it is necessary to maintain a humidity balance. The aim of this work is to create a mechatronic system for controlling air humidity in a greenhouse. The peculiarity of the approach is a shifted algorithm for controlling sprayers based on a daily weather forecast. A computer model of the greenhouse complex was substantiated and developed, which takes into account additional compensation for water vapor, convection, and forced air movement in the greenhouse. Based on the results of the research, a mathematical model of changes in water vapor flow in the greenhouse in accordance with changes in ambient air humidity during the day was developed in the SOLIDWORKS software environment. A simulation of changes in air parameters in a greenhouse during one day was carried out to forecast the weather in the Kherson region (May 17, 2023). The modeling was based on the design parameters of the greenhouse, the initial temperature in the greenhouse of 20°C, the ambient temperature in the range from 13.9°C to 26.2°C according to the weather forecast, and the initial air humidity of 70%. It was found that the obtained characteristics allow us to estimate the overall coefficient of air saturation with water vapor, which served as the basis for determining the required performance of compensating injectors and developing a control cyclogram for the greenhouse air humidity stabilization system. To ensure stable humidity in the greenhouse, a mechatronic hydraulic fogging system was developed. Based on the results of the model experiment, the coordinates of the injectors were determined and their operation mode, namely the control algorithm, was developed. The results of the study and the developed control algorithm are suitable for use in mechatronic microclimate control systems, taking into account daily changes in environmental parameters. The algorithm provides for switching on the fogging system, updating the current values of variables, polling sensors, and updating the set of control commands. The logic of the control process is based on the definition and development of modes in three humidity ranges: 70-65%; 65-60%; 60-50%

Keywords: mechatronic system; hydraulic system; control system; microclimate; humidity; flow rate; greenhouse