

УДК 631.344.5:519.87

В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, С. А. ЩЕРБИНА²

^{1*}Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 101 19 78, ел. пошта vikabelyeva604@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

²Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 362 77 89, ел. пошта s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Математичне моделювання температурних полів у культивацийних спорудах

Мета. Основна мета статті полягає в розробці методу розрахунку теплових полів у ґрунті теплиць в разі його штучного обігріву. Оскільки температурний режим у ґрунті теплиць має істотний вплив на врожайність рослин, дуже важливо, з одного боку, забезпечити потрібну температуру в ґрунті, а з іншого – визначити енергоощадний режим обігріву. **Методика.** Для побудови методу використано чисельне інтегрування рівняння теплопереносу. Для аналізу та прогнозування нестационарного процесу нагрівання ґрунту в теплиці в разі його штучного обігріву використано двовимірне рівняння теплопереносу, а для його розв'язання – дві скінченнорізницьові схеми. На базі побудованих чисельних моделей розроблено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту. **Результати.** Створено ефективні комп'ютерні моделі для прогнозування нестационарного формування теплових зон у ґрунті теплиці під час її штучного обігрівання. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено прогностичні чисельні моделі для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті теплиць під час його штучного нагрівання. На базі розроблених чисельних моделей створено комплекс прикладних програм для проведення обчислювального експерименту з визначення нестационарного поля температури в ґрунті теплиць. Побудовані чисельні моделі належать до класу «operational models», тобто розроблені для оперативного аналізу теплових полів у ґрунті. Для практичного використання розроблених чисельних моделей потрібна стандартна вхідна інформація. **Практична значимість.** Побудовані чисельні моделі становлять інструмент для аналізу динаміки нагрівання ґрунту та можуть бути використані піл час розробки енергоощадної технології обігріву. За допомогою цих моделей можна визначати час оптимального нагрівання ґрунту в різних зонах (коренева система, поверхня ґрунту) та визначати раціональне місце розташування нагрівальних елементів, час, коли потрібно вимкнути нагрівальні елементи, та час, коли їх потрібно ввімкнути знову. Тобто ці моделі дозволяють розробити енергоощадну технологію обігрівання ґрунту в теплиці.

Ключові слова: обігрів ґрунту; теплиця; енергозбереження; чисельне моделювання

Вступ

Для успішного вирощування рослин у культивацийних спорудах, особливо в холодну пору року, дуже важливо підтримувати стабільну температуру [2, 5–9]. Недостатнє тепло може призвести до уповільнення росту, зниження врожайності і навіть загибелі рослин. Правильно підібрана система обігріву дозволяє створити сприятливі умови для вирощування культур і мінімізувати енергетичні витрати. Існує декілька способів обігріву теплиць, які використовують залежно від розмірів споруди, кліматичних умов і особливостей вирощуваних культур. Розглянемо ці способи.

Пічне опалення. Це один із традиційних способів, коли для обігрівання теплиці використовують піч, а як паливо – дрова, вугілля, брикети (рис. 1).

Такий спосіб обігріву відзначається простою встановлення, особливо для невеликих теплиць, та незалежністю від зовнішніх джерел енергії. До того ж велике значення має доступність палива в деяких регіонах. До недоліків такого виду опалення слід віднести нерівномірний розподіл тепла: біля печі може бути занадто жарко, а в далеких куточках холодно. Такий спосіб потребує постійного контролю і регулярного додавання палива. Окрім того, існує небезпека пожежі в разі неправильної експлуатації.



Рис. 1. Пічне опалення в теплицях
(https://www.facebook.com/photo.php?fbid=176478976332848&id=158836721430407&set=a.164091977571548&locale=sk_SK)

Fig.1. Stove heating in greenhouses
(https://www.facebook.com/photo.php?fbid=176478976332848&id=158836721430407&set=a.164091977571548&locale=sk_SK)

Електричне опалення. Електричні обігрівачі, тепловентилятори або конвектори є популярними для обігріву теплиць, оскільки дозволяють точно контролювати температуру.



Рис. 2. Обігрів теплиць за допомогою тепловентиляторів
(<https://vts-volcano.com.ua>)

Fig. 2. Heating greenhouses with fan heaters
(<https://vts-volcano.com.ua>)

Використання електричних приладів для опалення теплиць вирізняється простотою: достатньо увімкнути прилад у розетку. Можливість точного контролю температури за допомогою термостатів та рівномірний розподіл тепла в теплиці також робить цей спосіб доволі популярним.

Попри це мають місце високі експлуатаційні витрати через вартість електроенергії, та залежність від електромережі: у випадку вимкнення електрики теплиця залишиться без тепла. Слід зауважити, що іноді ефективність використання електричного опалення є обмеженою через ве-

ликі розміри теплиць. У деяких випадках може знадобитися встановлення кількох обігрівачів.

Водяне опалення. У системах водяного опалення використовують котел і труби, по яких циркулює гаряча вода. Це забезпечує рівномірний обігрів теплиці по всій її площі. До додаткових переваг водяного опалення належать: можливість автоматизації та налаштування системи, економічність за умови правильного встановлення та використання обладнання.

До недоліків такого способу обігріву можна віднести: високі початкові витрати на встановлення, потребу в регулярному технічному обслуговуванні системи та залежність від джерела тепла – газ, електрика або тверде паливо.

Газове опалення. Газові котли або теплогенератори працюють на природному газі або пропані, що дозволяє ефективно обігрівати теплицю. Таке устаткування має високу потужність, що дозволяє швидко прогрівати повітря в теплиці, та дає змогу забезпечити автоматизацію процесу, що знижує необхідність постійного контролю. У регіонах із дешевим газом цей вид обігріву є доволі економічним.

Слід зауважити, що в разі використання газового опалення теплиць необхідно суворо дотримуватися заходів безпеки через ризик витоку або вибуху газу. За неправильного розташування обладнання може мати місце нерівномірний прогрів. Також залишається ймовірність залежності від постачання газу.

Інфрачервоне опалення. Інфрачервоні обігрівачі випромінюють тепло, яке безпосередньо поглинають поверхні рослин і ґрунту, нагріваючи їх.



Рис. 3. Інфрачервоне опалення культивування споруд
(<https://gaston.com.ua/blog/pro-otoplenie/>)

Fig. 3. Infrared heating of cultivation facilities
(<https://gaston.com.ua/blog/pro-otoplenie/>)

Інфрачервоне опалення є ефективним та економічним, оскільки енергія спрямована прямо на об'єкти. Цей спосіб вирізняється простотою встановлення обладнання і можливістю локалізованого обігріву. Додатковою перевагою є низьке споживання енергії порівняно з іншими електричними обігрівачами.

Водночас локальний характер обігріву можна віднести і до недоліків, отже нагріваються лише ті зони, на які спрямоване випромінювання. Тому виникає необхідність у точному розрахунку потужності і розташування приладів для рівномірного обігріву. Слід відзначити високі початкові витрати на якісні інфрачервоні обігрівачі.

Електрообігрів ґрунту теплиць. Цей метод передбачає встановлення нагрівальних кабелів під поверхнею ґрунту, що дозволяє рівномірно прогрівати ґрунт і, відповідно, кореневу систему рослин.

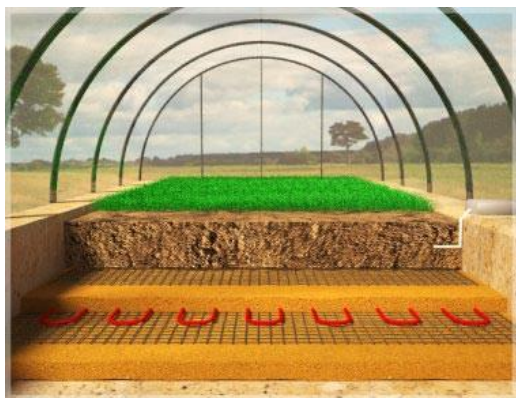


Рис. 4. Встановлення електричних кабелів під поверхню ґрунту
(<https://teplomontag.in.ua/ua>)

Fig. 4. Installation of electrical cables under the surface of the soil
(<https://teplomontag.in.ua/ua>)

Електрокабелі забезпечують рівномірне прогрівання ґрунту, що сприяє поліпшенню кореневого росту та скорочує час укорінення рослин. У цьому випадку важливо відзначити також фактор енергозбереження, оскільки тепло розповсюджується безпосередньо в ґрунті, мінімізуючи втрати тепла.

Електрообігрів не потребує великої кількості обладнання і дозволяє автоматизувати підтримання температурного режиму.

До недоліків обігріву теплиць за допомогою електричних кабелів слід віднести: високі витрати на встановлення, оскільки потрібна підготовка ґрунту і прокладання системи кабелів; обмежену сферу застосування (кабелі ефективні лише для обігрівання ґрунту, а не повітря в теплиці) та залежність від стабільного джерела електроенергії, що вимагає надійної електромережі.

Встановлення сучасних та ефективних систем обігріву культивацийних споруд не тільки сприяє підтриманню потрібної температури всередині, але й допомагає скоротити витрати на енергію. Наприклад, автоматизовані системи з термостатами дозволяють точно регулювати температуру, запобігаючи як перегріву, так і переохолодженню. Ізоляція теплиці та використання джерел тепла, що відповідають конкретному регіону і розміру теплиці, також важливі для мінімізації витрат.

Таким чином, вибір системи обігріву теплиці залежить від багатьох чинників: доступності ресурсів, розміру теплиці, кліматичних умов і бюджету. У кожному випадку важливо врахувати всі переваги та недоліки різних методів обігріву, щоб забезпечити рослинам комфортні умови та оптимізувати витрати.

Для наукового обґрунтування параметрів системи опалення теплиць необхідно розв'язати комплекс важливих задач. До особливо важливих задач належить проблема раціонального обігріву ґрунту в теплиці. Це пов'язано з тим, що коренева система рослин повинна перебувати в певному діапазоні температур. Підтримка цього діапазону температури дозволяє позитивно впливати на врожайність. З іншого боку, раціональний режим обігріву ґрунту в теплиці дозволяє знизити енерговитрати підприємства та собівартість продукції. Для обґрунтування режиму обігріву необхідно мати спеціальні математичні моделі і методи розрахунку. У зв'язку з цим важливим науковим завданням є розробка методів розрахунку багатofакторного процесу обігріву ґрунту для вибору енергоощадного режиму обігріву.

Мета

Робота спрямована на розробку методу розрахунку теплових полів у ґрунті теплиць для його штучного обігріву.

Методика

Для аналізу та прогнозування температурного режиму в ґрунті теплиці використовуємо рівняння теплопровідності [1, 4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

де T – температура ґрунту; $a = (a_x, a_y)$ – коефіцієнти температуропровідності; x, y – декартові координати розташування нагрівальних елементів; t – час.

Крайові умови для моделювального рівняння (1) такі (рис.1):

1. На сторонах розрахункової зони реалізуємо умову «теплоізоляованої» стінки.

2. У початковий момент часу беремо, що в розрахунковій зоні відома температура T_0 .

3. У різницевих комірках, де розташовані нагрівальні елементи, задаємо відому температуру T_s , яку підтримуємо постійною (гранична умова першого роду.)

Чисельна модель. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1) використовуємо прямокутну різницеву сітку [1, 3]. Для завдання місця розташування нагрівальних елементів у ґрунті, де підтримують постійну температуру T_s , використовуємо маркери. Ці маркери дозволяють формувати будь-яку схему розташування цих елементів у дискретній моделі.

Чисельне інтегрування рівняння (1) здійснюємо за допомогою двох скінченнорізницевоїх схем. Перша різницєва схема – явна, що має такий вигляд [1]:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} a_x + \Delta t \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} a_y.$$

Друга скінченнорізницєва схема, яку використовують для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1), – це різницєва схема сумарної апроксимації. Ця схема має вигляд двокрокового розщеплення :

– перший крок:

$$\frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

– другий крок:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Невідоме значення температури на кожному кроці розщеплення визначаємо за явною формулою.

На базі розглянутих чисельних моделей зроблено комплекс прикладних програм «SOIL-T», мова програмування FORTRAN. До складу цього комплексу програм входять такі підпрограми типу SUBROUTINE:

ST1 – розрахунок поля температури в ґрунті за допомогою явної різницевої схеми;

ST2 – розрахунок поля температури в ґрунті на базі різницевої схеми сумарної апроксимації;

ST3 – реалізація граничних умов;

ST4 – друк поля температури в ґрунті.

Координацію роботи підпрограм здійснює основна програма MAIN. Початкові дані для проведення обчислювального експерименту формуються у файлі початкових даних TE.dat.

Результати

На першому етапі виконано верифікацію побудованих чисельних моделей. Для цього було розглянуто тестову задачу, що має аналітичний розв’язок, у такій постановці: є прямокутна зона, де початкова температура дорівнює $400 \text{ }^\circ\text{C}$; зона має розмір $20 \times 15 \text{ м}$; на межах зони ставимо умову: $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $a = 1$. Визначаємо температуру в точці $x = 1 \text{ м}$, $y = 1 \text{ м}$ для різних моментів часу.

Аналітичний розв’язок цієї задачі відомий та має вигляд (А. Д. Полянін та інші):

$$T = T_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right).$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Розрахунок температури на базі аналітичного розв’язку та розроблених чисельних моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення температури

Table 1

Temperature values

Час	Аналітична модель	Перша чисельна модель	Друга чисельна модель
2 с	54,76 °C	55,20 °C	55,23 °C
4 с	29,16 °C	29,31 °C	29,34 °C
6 с	19,71 °C	20,23 °C	20,25 °C

Аналіз даних із табл. 1 вказує на задовільне узгодження чисельних результатів та аналітичного розв’язку.

На другому етапі було розв’язано модельну задачу з визначення поля температури в ґрунті теплиці.

Метою проведеного обчислювального експерименту була перевірка розроблених чисельних моделей на можливість визначення нестационарного температурного поля в ґрунті в разі дії декількох джерел емісії тепла та за наявності багатозв’язаної розрахункової зони. Відомо, що за таких умов чисельні моделі втрачають стійкість та не можуть бути використані для прогнозних розрахунків. Тому ставимо завдання перевірки працездатності побудованих чисельних моделей для розв’язку прикладних задач.

Розглянуто два сценарії. Перший сценарій: в однорідному ґрунті наявні два елементи, що підтримують постійну температуру 45 °C (рис. 5). Другий сценарій: у ґрунті додатково розташована теплоізолювана пластина, що впливає на формування температурного поля (багатозв’язана зона). Початкова температура ґрунту становить 20 °C.

Розрахункові параметри (безрозмірне значення) для проведення обчислювального експерименту такі: розміри зони $L_x = 1$, $L_y = 1,6$; $a = 0,02$; початок кореневої системи показано на рисунках нижче штриховою лінією.

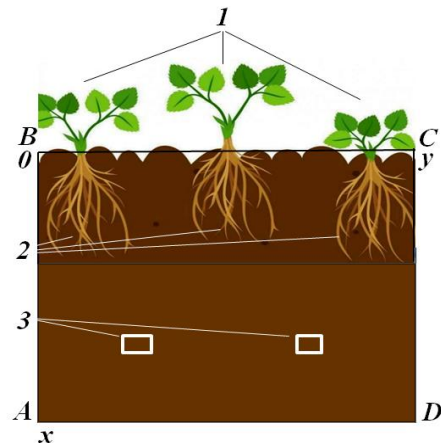


Рис. 5. Схема розрахункової області
1 – рослини; 2 – коренева система;
3 – нагрівальний елемент

Fig. 5. Scheme of the calculation area
1 – plants; 2 – root system; 3 – heating element

Результати обчислювального експерименту показано на рис. 6–10. Значення температури та час наведено в безрозмірному вигляді. Для визначення прогнозного значення температури в деякій точці ґрунту на основі даних, що наведені на рисунках, потрібно здійснити такий розрахунок:

$$T = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) * \frac{T_d}{99},$$

де T_{min} – мінімальна температура ґрунту в зоні дослідження ($T_{min} = 20$ °C); T_{max} – максимальна температура ґрунту в зоні дослідження ($T_{max} = 45$ °C); T_d – число, вказане в матриці розподілу температури; T – прогнозне значення температури ґрунту в точці.

Відзначимо, що значенню маркера «99» відповідає температура 45 °C, а значенню маркера «0» відповідає температура 20 °C.

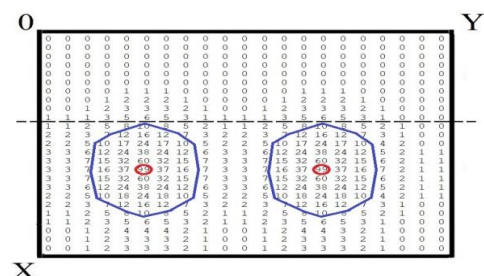


Рис. 6. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0,39$

Fig. 6. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0,39$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

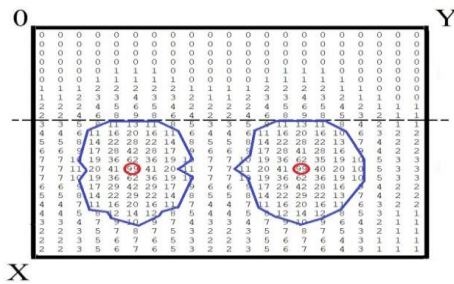


Рис. 7. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0.59$

Fig. 7. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0.59$

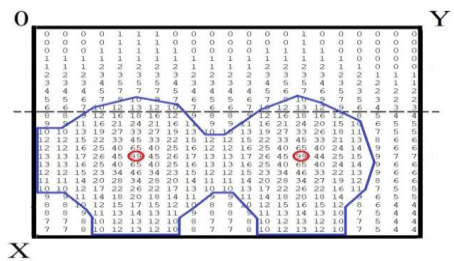


Рис. 8. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0.99$

Fig. 8. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0.99$

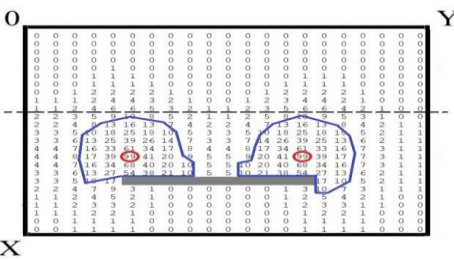


Рис. 9. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 2, $t = 0.39$

Fig. 9. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 2, $t = 0.39$

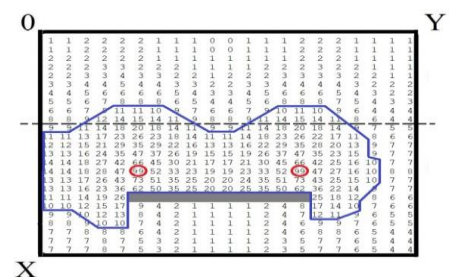


Рис. 10. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 2, $t = 0.99$

Fig. 10. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 2, $t = 0.99$

Аналіз результатів моделювання показує, що на початку процесу нагрівання ґрунту зона прогріву має форму кола з центром, що відповідає розташуванню нагрівальних елементів. Із часом має місце процес «з'єднання» цих зон. На момент часу $t = 0.39$ «теплова хвиля» від нагрівальних елементів досягає кореневої системи та починає рух у бік поверхні ґрунту в теплиці. Із рис. 9 і 10 можна бачити, що побудовані чисельні моделі дозволяють прогнозувати вплив додаткових конструктивних елементів у ґрунті на формування теплових зон. Час розрахунку кожного варіанту задачі – 4 с.

Таким чином, розроблені чисельні моделі являють собою інструмент для аналізу динаміки нагрівання ґрунту, що можуть бути використані для розробки енергоощадної технології обігріву. Ці моделі дають змогу визначати час оптимального нагрівання ґрунту в різних зонах (коренева система, поверхня ґрунту), визначати раціональне місце розташування нагрівальних елементів, час, коли потрібно вимкнути нагрівальні елементи, та час, коли їх потрібно ввімкнути знову. Тобто ці моделі дозволяють розробити енергоощадну технологію обігріву ґрунту в теплиці.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено прогностичні чисельні моделі для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті теплиць у разі його штучного обігрівання.

На базі розроблених чисельних моделей створено комплекс прикладних програм для проведення обчислювального експерименту з визначення нестационарного поля температури в ґрунті теплиць.

Побудовані чисельні моделі належать до класу «operational models», тобто розроблені для оперативного аналізу теплових полів у ґрунті. Для практичного використання цих моделей потрібна стандартна вхідна інформація.

Висновки

1. Виконано аналіз наявних систем опалення теплиць.
2. Розроблено дві чисельні моделі для аналізу та прогнозування теплових полів у ґрунті у випадку використання системи опалення ґрунту.

3. Створено комплекс прикладних програм, що дозволяють визначати динаміку формування теплових полів у ґрунті під час його нагрівання.

4. Здійснено верифікацію розроблених чисельних моделей, що підтвердило їх адекватність.

5. Результати обчислювального експерименту показують, що розроблені чисельні моделі дають можливість отримати важливу прогностичну інформацію, яка необхідна для аналізу формування теплових полів у ґрунті під час його штучного обігрівання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях*: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Прокопенко Т. О. Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24, Ч. 2. С. 40–51.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Transport Means 2022 : Proceedings of 26th International Scientific Conference* (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P. 122–127.
5. Dimitropoulou A.-M. N., Maroulis V. Z., Giannini E. N. A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788>
6. Faniyi B., Luo Z. A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708>
7. Katzin D., Marcelis L. F. M., van Henten E. J., van Mourik S. Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 230. P. 242–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003>
8. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. P. 1–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815>
9. Wang J., Lee W. F., Ling P. P. Ling Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation, *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653>

V. V. BILIAIEVA^{1*}, S. A. SHCHERBYNA²

^{1*}Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 101 19 78, e-mail vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

²Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 362 77 89, e-mail s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Mathematical Modeling of Temperature Fields in Cultivation Structures

Purpose. The main purpose of the article is to develop a method for calculating thermal fields in greenhouse soil in the case of its artificial heating. Since the temperature regime in greenhouse soil has a significant impact on plant yields, it is very important, on the one hand, to ensure the required temperature in the soil, and on the other hand, to determine the energy-saving heating regime. **Methodology.** The method is based on the numerical integration of the heat transfer equation. A two-dimensional heat transfer equation was used to analyze and predict the unsteady process of soil heating in a greenhouse under artificial heating, and two finite-difference schemes were used to solve it. On the basis of the constructed numerical models, a computer program was developed to conduct a computational experiment. **Findings.** Effective computer models have been created to predict the unsteady formation of thermal zones in the greenhouse soil during its artificial heating. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** Prognostic numerical models have been developed to analyze the dynamics of thermal fields formation in greenhouse soil during its artificial heating. On the basis of the developed numerical models, a set of application programs was created to conduct a computational experiment to determine the unsteady temperature field in green-

house soil. The constructed numerical models belong to the class of «operational models», i.e., they are designed for the operational analysis of thermal fields in the soil. For the practical use of the developed numerical models, standard input information is required. **Practical value.** The constructed numerical models are a tool for analyzing the dynamics of soil heating and can be used in the development of energy-saving heating technology. These models can be used to determine the time of optimal soil heating in different zones (root system, soil surface) and to determine the rational location of heating elements, the time when the heating elements should be turned off, and the time when they should be turned on again. These models allow us to develop an energy-saving technology for heating the soil in a greenhouse.

Key words: soil heating; greenhouse; energy saving; numerical modeling

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannia v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochychk mistsiakh*: monografiya. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Vikhrova, L. H., Kalich, V. M., & Prokopenko, T. O. (2011). A mathematical and computer design of distributing of temperatures in a hothouse. *Collection of Scientific Works of the Kirovohrad National Technical University. Series: Engineering in agricultural production, industrial engineering, automation, 24(2)*, 40-51. (in Ukrainian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniia v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Biliaiev, M., Rusakova, T., Biliaieva, V., Kozachyna, V., Berlov, O., & Semenenko, P. (2022). Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. In *Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference* (pp. 122-127). Kaunas, Lithuania. (in English)
5. Dimitropoulou, A.-M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies, 16*, 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788> (in English)
6. Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies, 16*, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708> (in English)
7. Katzin, D., Marcellis, L. F. M., van Henten, E. J., & van Mourik, S. (2023). Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering, 230*, 242-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003> (in English)
8. Sun, W., Wei, X., Zhou, B., Lu, C., & Guo, W. (2022). Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy, 325*, 1-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815> (in English)
9. Wang, J., Lee, W. F., & Ling, P. P. (2020). Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences, 10*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.08.2024

Прийнята до друку: 13.12.2024