

УДК 631.234:697.35

В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, С. А. ЩЕРБИНА²

^{1*}Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, 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, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 362 77 89, ел. пошта s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Експрес-модель для аналізу процесу нагрівання ґрунту в теплиці

Мета. Організація штучного підігрівання ґрунту в теплиці відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного вирощування рослин, адже оптимальна температура ґрунту є ключовим чинником цього процесу. Саме нагрівання необхідно проводити так, щоб забезпечити певний діапазон температур у ґрунті, зокрема в зоні розташування кореневої системи рослин. Процес нагрівання ґрунту залежить від конкретних умов експлуатації теплиць. Для організації раціонального та енергоощадного процесу необхідно заздалегідь, на етапі проектування системи нагрівання, визначити параметри її роботи. Ефективним методом розв'язку цієї задачі є використання математичних моделей. Основна мета роботи полягає в розробці одновимірної експрес-моделі для оцінювання процесу прогрівання ґрунту в теплиці. **Методика.** Для дослідження динаміки штучного нагрівання ґрунту використано рівняння теплопровідності. Чисельне інтегрування моделювального рівняння здійснено за допомогою скінченнорізницевої схеми сумарної апроксимації. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої можна проводити обчислювальний експеримент із визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту в теплиці. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено одновимірну чисельну модель для аналізу штучного прогрівання ґрунту в теплиці. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння теплопровідності та дозволяє швидко визначити динаміку формування теплових полів у ґрунті як у разі роботи нагрівального елемента, так і в разі його вимикання. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може стати корисним інструментом на етапі проектування систем штучного нагрівання ґрунту. Вона забезпечує наукове обґрунтування параметрів нагрівальних систем та енергоефективних режимів їх роботи. Модель дозволяє швидко оцінювати динаміку формування теплових полів у ґрунті як під час роботи нагрівального елемента, так і після його вимикання. Для практичного застосування чисельної моделі потрібна лише стандартна вхідна інформація. Контроль динаміки нагрівання ґрунту відкриває можливості для оптимального управління режимами роботи системи нагрівання.

Ключові слова: енергозбереження; теплопровідність; прогрівання ґрунту; теплиця; математичне моделювання

Вступ

Оптимальна температура ґрунту – ключовий фактор успішного вирощування рослин у теплицях. Навіть за умови задовільного повітряного опалення недостатнє прогрівання ґрунту може сповільнити ріст кореневої системи, вплинути на засвоєння поживних речовин і знизити врожайність. У [2] було розглянуто різні методи опалення теплиць, їх переваги та недоліки. У цій статті увагу буде зосереджено саме на аналізі процесу нагрівання ґрунту в теплиці.

Температура ґрунту прямо впливає на фізіологічні процеси рослин. За занадто холодної

температури ґрунту уповільнюється ріст коренів, погіршується поглинання води і поживних речовин, зростає ризик виникнення захворювань. Крім того, недостатнє прогрівання може призвести до затримки розвитку рослин і зниження якості врожаю. Наприклад, теплолюбні культури, такі як помідори та огірки, особливо чутливі до температурних коливань у зоні кореневої системи.

З іншого боку, правильне прогрівання ґрунту дозволяє створити сприятливі умови для кореневої системи, сприяє активному обміну речовин і збільшенню врожайності. Це особливо важливо в регіонах із холодним кліматом або в міжсезоння [6, 7].

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Прогрівання ґрунту можна реалізувати різними способами залежно від технічних можливостей, бюджету та потреб теплиці. Розглянемо ці способи більш детально.

Електричні системи опалення. Одним із найбільш популярних методів є кабельні системи опалення. Вони являють собою електричні нагрівальні елементи, укладені під шар ґрунту. Кабелі дозволяють рівномірно розподілити тепло і підтримувати задану температуру. Такий метод відрізняється простотою встановлення і точністю управління, але вимагає значних енерговитрат (рис. 1).



Рис. 1. Електрична система опалення теплиці
<https://eco-obogrev.com>

Fig. 1. Electric greenhouse heating system
<https://eco-obogrev.com>

Водяні системи (гидравлічне опалення). Водяні системи працюють за принципом теплої підлоги, коли нагріта вода циркулює по трубках, укладених під ґрунт. Цей метод ефективний для великих теплиць і дозволяє використовувати відновлювані джерела енергії, такі як сонячні колектори. Проте встановлення системи вимагає значних початкових витрат.

Універсальність методу водяного підігрівання ґрунту теплиць полягає в широкому виборі енергоносіїв, адже нагрівати теплоносієм можна чим завгодно, що більш вигідно. Тут важливо правильно укласти петлі нагрівальних контурів із труб та організувати підтримання необхідної температури ґрунту. Найзручніше використовувати в парниковій споруді газовий котел, він може нагрівати воду до 35–40 °С, що є проблемою для твердопаливних котлів.

А найбільш комфортне рішення – провести до теплиці опалювальні магістралі від домашнього котла за умови достатньої його потужності (рис. 2).

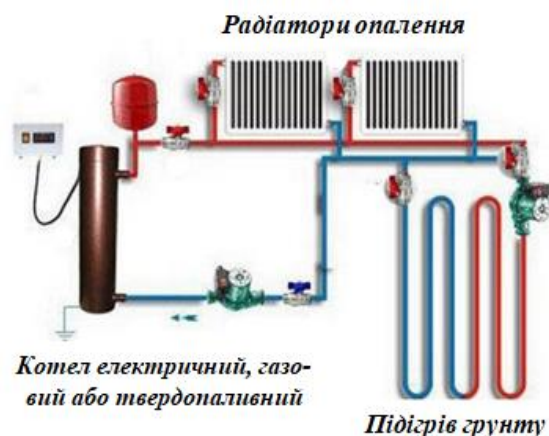


Рис. 2. Схема водяного підігрівання ґрунту в теплиці
<https://eco-obogrev.com>

Fig. 2. Scheme of water heating of soil in a greenhouse
<https://eco-obogrev.com>

Теплові мати та плівки. Теплові мати та плівки є компактним і доступним рішенням для невеликих теплиць (рис. 3).



Рис. 3. Прогрівання кореневої системи рослин інфрачервоною плівкою
<https://leto.net.ua>

Fig. 3. Warming the root system of plants with infrared film
<https://leto.net.ua>

Їхні переваги – легкість монтажу, мобільність і низьке енергоспоживання. Проте такі системи підходять переважно для точкового опалення (рис. 4).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА



Рис. 4. Підігрівання кореневої системи під лотками з рослинами
<https://leto.net.ua>

Fig. 4. Heating the root system under plant trays
<https://leto.net.ua>

Альтернативні методи. Біопаливо та органічні підстилки – це традиційний, але ефективний спосіб підтримання тепла в ґрунті. Під час розкладання органіки виділяє тепло і насичує ґрунт корисними речовинами. За активної діяльності мікроорганізмів температура органічного матеріалу, тобто біопалива, може досягати 72 °С. Тому процес розкладу мікроорганізмами біопалива з виділенням тепла умовно називають горінням. Гаряче біопаливо використовують у захищеному ґрунті для підтримки температури на потрібному рівні. Як біопаливо використовують гній тварин в суміші з пухкими матеріалами (солома, тирса, торф верховий, листя), відходи деревообробних підприємств (кора, стружка, тирса, тріски), міське сміття, що складається з органічних відходів.

Для розігрівання біопалива його перебивають і пухко укладають у штабель, у середину якого закладають гарячі камені або палаюче вугілля. Через 3–5 днів біопаливо має почати горіти, і його можна використовувати для обігрівання захищеного ґрунту.

Під час використання біопалива слід мати на увазі, що максимуму температура всередині штабеля досягає приблизно через тиждень після його розігрівання, потім вона поступово знижується. Проте виділення тепла може тривати протягом 2–3 місяців і більше (рис. 5).

Також можливе використання сонячної енергії для підігрівання – встановлення сонячних батарей або колекторів.



Рис. 5. Облаштування парника з обігрівом гарячим біопаливом
<https://teplitca.kiev.ua>

Fig. 5. Arrangement of a greenhouse heated with hot biofuel
<https://teplitca.kiev.ua>

Кожен із розглянутих методів має свої особливості. Наприклад, електричні кабелі забезпечують високу точність контролю температури, але їх експлуатація обходиться дорого. Водяні системи підходять для великих господарств, але потребують професійного монтажу. Теплові мати прості у використанні, проте обмежені в потужності. Альтернативні методи є більш екологічними, але їх ефективність залежить від зовнішніх умов.

Під час вибору системи опалення ґрунту слід враховувати розміри теплиці, тип вирощуваних культур, клімат регіону та бюджет. Для невеликих теплиць підійдуть теплові мати або кабелі. У великих господарствах краще використовувати водяні системи або комбінувати кілька методів. Також важливо правильно налаштувати й обслуговувати обладнання, щоб уникнути перевитрат енергії та поломок.

Крім того, сучасні технології дозволяють мінімізувати вплив на навколишнє середовище. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, робить процес опалення більш екологічним. Біопаливо та органічні методи допомагають скоротити викиди вуглекислого газу і поліпшити структуру ґрунту.

Немає сумнівів, що прогрівання ґрунту – це невід’ємна частина ефективного вирощування рослин у теплицях. Правильно підібрана система опалення допомагає захистити кореневу систему, прискорити ріст рослин і підвищити

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

врожайність. Вибір відповідного методу залежить від багатьох факторів, але головне – це турбота про рослини і прагнення до сталого розвитку сільського господарства. Поєднання сучасних технологій та екологічних рішень стане запорукою успішного і стабільного виробництва [8, 9].

Для наукового обґрунтування параметрів системи опалення теплиць необхідно вирішити низку важливих завдань, серед яких особливу увагу слід приділити оптимізації обігрівання ґрунту [10]. Це зумовлено тим, що для нормального розвитку кореневої системи рослин необхідно підтримувати температуру в певному діапазоні. Дотримання цього температурного режиму позитивно впливає на урожайність. Водночас ефективний обігрів ґрунту дозволяє зменшити енергоспоживання підприємства та знизити собівартість виробництва. Для визначення оптимального режиму обігріву потрібні спеціальні математичні моделі й методи розрахунку [3]. Тому актуальним завданням є створення методів аналізу багатофакторного процесу обігрівання ґрунту для вибору енергоефективного режиму.

Відомо, що в разі використання штучного нагрівання ґрунту для різних сільськогосподарських культур вкрай важливо підтримувати певну температуру на визначеній глибині в ґрунті теплиці. При цьому слід забезпечити такий режим нагріву, щоб мінімізувати витрати енергії на обігрів. Це пов'язано з тим, що наразі існує тенденція до використання зрідженого газу для опалення, який є досить дорогим для підприємств, а особливо для невеликих фермерських господарств.

Вибір режиму нагріву ґрунту в теплиці потребує інформації про формування теплових полів у ґрунті за різних умов. Для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті використовують метод фізичного моделювання. Цей метод має такі переваги:

- 1) забезпечує наочну інтерпретацію результатів дослідження;
- 2) результати експериментальних досліджень можуть бути використані для тестування теоретичних моделей;
- 3) результати експериментальних досліджень є практично беззаперечними.

Однак фізичний експеримент має також певні недоліки:

- 1) постановка експерименту потребує значного часу;
- 2) висока вартість обладнання, яке використовують для проведення експерименту;
- 3) значні витрати часу на підготовку експерименту, його проведення та обробку даних вимірювань;
- 4) існують фізичні процеси, для яких проведення фізичного експерименту є неможливим або дуже складним.

З теоретичної точки зору задача прогрівання ґрунту в теплиці належить до задач теплопровідності. Для розв'язку задач цього класу використовують такі теоретичні методи (М. М. Беляєв, О. О. Рядно «Методи теорії теплопровідності»):

1. Класичні методи розв'язання рівняння теплопровідності: метод Фур'є, використання функцій Гріна, метод теплових потенціалів.
2. Метод інтегральних перетворень у нескінченних межах, у скінченних межах.
3. Варіаційні методи: метод Рітца, метод Канторовича, метод Треффца, метод Лейбензона, метод Біо.
4. Методи лінеаризації: метод збурень, метод послідовних наближень тощо.
5. Проскційні методи: метод колокацій, метод Бубнова–Галеркіна, інтегральні методи тощо.

1. Методи зведення крайової задачі до рівнянь іншого типу, а саме:

- зведення крайової задачі з нелінійними граничними умовами до еквівалентного нелінійного функціонального рівняння;
- зведення крайової задачі з коефіцієнтами переносу, що залежать від температури, до нелінійного інтегрального рівняння;
- зведення крайової задачі теплопровідності до крайової задачі для звичайного диференційного рівняння з нелінійними граничними умовами.

2. Чисельні методи: метод скінченних різниць, варіаційно-різницеві методи, метод прямих [4].

3. Метод Монте–Карло.

Останнім часом найбільшого поширення набули чисельні методи розв'язання задач теплопровідності, які дозволяють знайти розв'язок крайової задачі практично без суттєвих спрощень фізичної постановки задачі. Ці методи мають такі переваги:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

1. Можливість проведення обчислювального експерименту з різним ступенем точності.

2. Можливість використання наявних комерційних програмних пакетів для дослідження динаміки формування температурних полів.

3. Дослідження теплових процесів, для яких неможливе проведення фізичного експерименту.

4. Економія часу на отримання результатів досліджень.

Утім, також варто зазначити недоліки чисельних моделей:

1. Досить висока вартість комерційних програмних пакетів для проведення досліджень процесів тепломасопереносу.

2. Необхідність наявності ліцензії на використання комерційного пакета для чисельного моделювання процесів тепломасопереносу.

3. Використання комерційних пакетів дозволяє вирішувати задачі лише у тій постановці, яка «закладена» в пакет. Налаштування пакета для інших задач є неможливим.

Слід зазначити, що особливість розглянутого процесу – визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту та обґрунтування раціональних, енергоощадних режимів нагріву ґрунту в теплицях – потребує проведення значної кількості розрахунків. Тому необхідна розробка швидких методів розрахунку теплового процесу нагрівання ґрунту з метою його наукового обґрунтування.

Мета

Робота спрямована на розробку одновимірної експрес-моделі для аналізу процесу штучного прогрівання ґрунту в теплиці, створення комп'ютерної програми для її реалізації та проведення обчислювального експерименту з визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту в умовах теплиці.

Методика

Розглядаємо процес нагрівання ґрунту в теплиці за рахунок теплового елемента, розташованого на глибині h у ґрунті. Поширення тепла в ґрунті здійснюється за рахунок теплопровідності. Моделювальне рівняння цього процесу має вигляд [1, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де T – температура ґрунту; a – коефіцієнт температуропровідності; x – декартова координата; t – час.

Крайові умови для моделювального рівняння (1) такі (рис. 6):

1. За $x = 0$ задана температура $T_s = 20^\circ\text{C}$, що підтримується постійною (гранична умова першого роду).

2. Наприкінці розрахункової зони реалізується умова «теплоізоляованої» стінки.

У початковий момент часу приймаємо, що в розрахунковій зоні відома температура $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Чисельна модель. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1) використовуємо схему сумарної апроксимації. Ця схема має вигляд двокрокового розщеплення:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Невідоме значення температури всередині ґрунту на кожному кроці розщеплення визначаємо за явною формулою біжного розрахунку.

Ця чисельна модель була реалізована у вигляді комп'ютерного коду «SOIL-1», мова програмування FORTRAN.

Для проведення розрахунків на базі побудованої чисельної моделі потрібно задати:

1. Глибину ґрунту в теплиці.
2. Зону розташування коріння рослин.
3. Місце розташування в ґрунті нагрівального елемента.
4. Коефіцієнт температуропровідності ґрунту.
5. Температуру нагрівального елемента.
6. Час, коли нагрівальний елемент припиняє «роботу».

7. Початкову температуру ґрунту.
8. Температуру на поверхні ґрунту ($x = 0$).
9. Температуру наприкінці розрахункової зони.

Початкові дані для проведення розрахунків наведені в файлі TE1.dat.

Результати

На першому етапі було здійснено тестування розробленої чисельної моделі. Для цього розглянуто розв'язок такого рівняння нестационарної теплопровідності [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Крайові умови для вказаного рівняння такі:

1. Ізотермічна умова на межі $x = 0$: $T = T_s$.
2. На іншій межі: $T(\infty, t) = T_0$.
3. Для моменту часу $t = 0$: $T(x, 0) = T_0$.

Ці крайові умови висвітлюють таку задачу: задана температура на поверхні ґрунту T_s внаслідок дії деякого джерела емісії тепла. Початкова температура ґрунту дорівнює T_0 . Потрібно визначити, як змінюється температура ґрунту з часом у деякій точці.

Аналітичний розв'язок цієї крайової задачі має вигляд (F. Kreith, W. Black):

$$T(x, t) = T_s + (T_0 - T_s) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right).$$

Ця залежність дозволяє визначити динаміку зміни температури всередині ґрунту для різних моментів часу.

Розв'язок крайової задачі знайдено за таких умов: $T_0 = 15^\circ\text{C}$ (початкова температура ґрунту); $a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $T_s = 100^\circ\text{C}$ (температура на поверхні ґрунту). Ставимо задачу – визначити динаміку зміни температури в точці $x = 5 \text{ см}$ від поверхні ґрунту ($x = 0$ – поверхня ґрунту). Під час проведення обчислювального експерименту довжину розрахункової зони взято 1 м, кількість розрахункових точок 500.

Результати розв'язку тестової задачі наведено в табл. 1.

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

Таблиця 1

Значення температури ґрунту на глибині 5 см

Table 1

Soil temperature value at a depth of 5 cm

Час	Аналітичний розв'язок	Чисельний розв'язок
2 000 с	37,1 °C	36,8 °C
5 000 с	55,8 °C	55,4 °C
7 200 с	62,2 °C	61,9 °C

На другому етапі було розв'язано модельну задачу з визначення динаміки зміни температури ґрунту в теплиці від нагрівального елемента, розташованого на глибині 48 см. Коренева система знаходиться на глибині 24 см. Розрахункова схема показана на рис. 6. Довжина розрахункової зони 1 м. Розглядаємо сценарій, коли в момент часу $t = 0$ температура нагрівального елемента дорівнює 60°C . В момент часу $t = 1\,000$ од. (час безрозмірний) нагрівальний елемент припиняє роботу. Ставимо задачу визначити динаміку зміни температури в ґрунті.

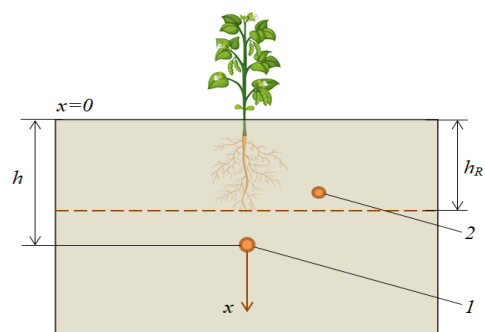


Рис. 6. Схема розрахункової зони:
1 – нагрівальний елемент (на глибині h);
2 – зона розташування коріння; h – глибина теплового елемента

Fig. 6. Scheme of the calculation area:
1 – heating element (at depth h); 2 – root location zone;
 h – depth of the heating element

На рис. 7 показано, як змінюється температура в ґрунті на ділянці 0 – 42 см, тобто на ділянці від поверхні ґрунту до зони розташування нагрівального елемента. Час на рисунку вказано у безрозмірному вигляді.

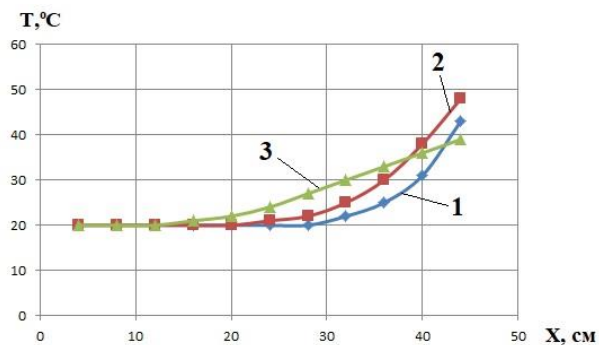


Рис. 7. Зміна температури в ґрунті для різних моментів часу:
1 – $t = 500$; 2 – $t = 1\,000$; 3 – $t = 2\,000$

Fig. 7. Change in soil temperature at different times:
1 – $t = 500$; 2 – $t = 1\,000$; 3 – $t = 2\,000$

Як бачимо з рис. 7, для обраного режиму нагріву ґрунту, тобто для нагрівання на часовій ділянці $[0 - 1\,000]$ температура ґрунту збільшується на глибині 24 см – 42 см. Значить, за цей проміжок часу нагрівання буде лише до «кінчиків» коріння. Далі прогрівання ґрунту зупиняється та починається спад температури на ділянці прогріву. Таким чином, за заданого режиму роботи нагрівального елемента ґрунт не встигає прогрітися до зони основного розташування кореневої системи. Отже, потрібно або збільшити час прогрівання ґрунту, або розташувати нагрівальний елемент ближче до кореневої системи. Тому обраний режим роботи нагрівального елемента не є раціональним.

Відзначимо, що час розрахунку на базі розробленої моделі складає 1 с.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено одновимірну чисельну модель для аналізу штучного прогрівання ґрунту в теплиці. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння теплопровідності. Розроблена модель дозволяє швидко визначити динаміку формування теплових полів у ґрунті як у разі роботи нагрівального елемента, так і в разі його вимикання.

Розроблена чисельна модель може бути корисна на етапі проектування систем для штучного нагрівання ґрунту. Модель дає можливість науково обґрунтувати параметри нагрівальних систем та енергоощадного режиму їх роботи.

Для практичного використання побудованої чисельної моделі потрібна стандартна вхідна інформація. У зв'язку з тим, що час розрахунку на базі розробленої чисельної моделі дорівнює 1 с, можна протягом робочого дня здійснити значну кількість варіантів розрахунків та обґрунтувати обраний режим штучного нагрівання ґрунту.

Висновки

1. Розглянуто способи прогрівання ґрунту в теплицях.
2. Виконано аналіз наявних методів розв'язку задач теплопровідності.
3. Розроблено одновимірну чисельну модель для розрахунку динаміки штучного нагрівання ґрунту.
4. Розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє швидко обґрунтувати режим штучного нагрівання ґрунту в теплиці.

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. Біляєва В., Щербина С. А. Математичне моделювання температурних полів у культивацийних спорудах. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4 (108). С. 13–20.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/316334>
3. 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 (2). С. 174–180.
4. 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.
5. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022*. 2022. P. 122–127.

6. 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. Iss. 19. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788>
7. Faniyi B., Luo Z. A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 6. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708>
8. 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>
9. 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>
10. Wang J., Lee W. F., Ling P. P. Ling Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 2. 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, SEI DMetl, 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, SEI DMetl, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 362 77 89, e-mail s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Express Model for Analyzing the Process of Soil Heating in a Greenhouse

Purpose. The organization of artificial soil heating in a greenhouse plays an important role in ensuring efficient plant cultivation, as the optimal soil temperature is a key factor in this process. The heating itself must be carried out in such a way as to ensure a certain temperature range in the soil, in particular in the area where the root system of plants is located. The soil heating process depends on the specific operating conditions of the greenhouse. To organize a rational and energy-saving process, it is necessary to determine the parameters of the heating system in advance, at the design stage. An effective method for solving this problem is to use mathematical models. The main purpose of the study is to develop a one-dimensional express model for evaluating the process of soil heating in a greenhouse. **Methodology.** The equation of thermal conductivity was used to study the dynamics of artificial soil heating. The numerical integration of the modeling equation was carried out using a finite-difference scheme of total approximation. **Findings.** A computer program has been developed that can be used to conduct a computational experiment to determine the dynamics of artificial soil heating in a greenhouse. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** A one-dimensional numerical model for analyzing artificial soil heating in a greenhouse has been developed. The model is based on the numerical integration of the heat conduction equation and allows us to quickly determine the dynamics of the formation of thermal fields in the soil both in the case of the heating element operation and in the case of its shutdown. **Practical value.** The developed numerical model can be a useful tool at the design stage of artificial soil heating systems. It provides scientific justification for the parameters of heating systems and energy-efficient modes of their operation. The model allows you to quickly assess the dynamics of thermal fields in the soil both during the operation of the heating element and after it is turned off. For practical application of the numerical model, only standard input information is required. Controlling the dynamics of soil heating opens up opportunities for optimal control of the heating system operation modes.

Key words: energy saving; thermal conductivity; soil heating; greenhouse; mathematical 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 robochychkh mistsiakh*: monografiya. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Biliaieva, V. V., & Shcherbyna, S. A. (2024). Mathematical Modeling of Temperature Fields in Cultivation Structures. *Science and Transport Progress*, 4(108), 13-20. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/316334> (in Ukrainian)
3. Vikhrova, L., Kalich, V., & Prokopenko, T. (2011). A mathematical and computer design of distributing of temperatures is in a hothouse. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 24(2), 174-180. (in Ukrainian)

4. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. 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. *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022*, 122-127. (in English)
6. 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(19), 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788> (in English)
7. Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*, 16(6), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708> (in English)
8. Katzin, D., Marcelis, 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)
9. 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)
10. Wang, J., Lee, W. F., & Ling, P. P. (2020). Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences*, 10(2), 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.11.2024

Прийнята до друку: 11.03.2025