

УДК 631.371:31

Л.Г.Віхрова, проф., канд.тех.наук, В.М. Каліч, проф., канд.тех.наук,  
Т.О.Прокопенко, асист.

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління

На основі розробленої математичної моделі і створеного програмного забезпечення проведений чисельний аналіз розподілу температури в приміщенні теплиці. Комп'ютерне моделювання температурних полів важливе при прогнозуванні параметрів мікроклімату теплиці в залежності від зовнішніх і внутрішніх факторів та забезпеченні їх необхідного діапазону і стабільності.

**результат, комп'ютерне моделювання розподілу температур ґрунту, повітря, споруд і рослин, приміщення теплиці, температурні поля**

**Вступ.** Споруди закритого ґрунту (СЗГ) - багатофакторне середовище, яке об'єднане поняттям мікроклімату. Основні фактори, які здійснюють вплив на систему - характеристики навколишнього середовища: температура, вологість повітря, швидкість вітру, довжина світлового дня та інтенсивність сонячного випромінювання. Мікроклімат в приміщеннях закритого ґрунту характеризується температурами: ґрунту, повітря, рослинної маси (листя, стебла, плоди), а також вологістю та вмістом CO<sub>2</sub> у повітряному середовищі теплиці. На тепловий режим в приміщенні теплиці впливають не тільки параметричні чинники, а також обмеження конструкції будівлі (стіни, скління, перекриття). Фактори мікроклімату, які підлягають регулюванню - температура, вологість, концентрація CO<sub>2</sub> і освітленість. Вони змінюються в функції часу.

Дослідження теплових режимів безпосередньо в теплиці ускладнено через незручності, пов'язані із встановленням вимірювальної апаратури, невисокої точності методів та технічних засобів для контролю і вимірювання параметрів теплових режимів, неможливості позбутися впливу неперервної зміни температури, тривалістю проведення експериментів. Прискорити і спростити процес дослідження теплових режимів в теплиці можна за допомогою їх моделювання. При моделюванні несталих теплових процесів, необхідно враховувати елементи, які імітують процеси теплопередачі в ґрунті і елементи, які враховують теплоємність повітря в самій теплиці.

Моделювання температурних полів в теплиці грає важливу роль при виборі параметрів мікроклімату, їх прогнозуванні в залежності від зовнішніх (сонячне випромінювання, температура довкілля, вологість, матеріал огороження) і внутрішніх факторів (потужність повітряних і ґрунтових нагрівачів) та забезпеченні необхідного діапазону параметрів мікроклімату і його стабільності. Визначення температурних полів в теплиці важливе перш за все тим, що дозволяє вибирати наперед потужність обігрівачів, прослідити і проаналізувати взаємозв'язок інтенсивності сонячної радіації з матеріалом огороження, температурою та вологістю довкілля і на основі цього аналізу прогнозувати значення температур на поверхні ґрунту, рослин, огороження при різних зовнішніх та внутрішніх характеристиках теплиці, що є необхідним для оцінки явищ, що відбуваються в теплиці і визначити температуру в приміщенні теплиці

взагалі. Теоретичному дослідженню температурних полів теплиць присвячено ряд робіт [1,2,4-6,11,13], у яких були отримані деякі аналітичні рішення, проте вони були виконані при ряді істотних спрощень. До таких, перш за все, слід віднести постійність теплофізичних характеристик матеріалів огороження, ґрунту, рослин, повітря при зміні температури, спрощені уявлення про теплообмін з навколишнім середовищем і умови надходження тепла в теплицю і так далі.

**Метою статті є** розробка математичної моделі, що описує температурні режими в теплиці та комп'ютерне моделювання теплових процесів в системі.

**Початкові умови побудови математичної моделі визначення температурного поля в системі теплиці навколишнього середовища .** При побудові математичної моделі була прийнята наступна схема теплового балансу культивационної споруди:

- сонячне випромінювання (радіація) частково поглинається світлопрозорим огороженням і потрапляє в теплицю, де перетворюється в теплоту на поверхні ґрунту;
- частина поглиненої теплоти передається конвекцією повітря, частина - поглинається ґрунтом;
- теплота повітряному середовищу передається від повітряних калориферів, розташованих у верхній частині будівлі теплиці;
- теплота ґрунту передається від розміщених рівномірно в ґрунті кабельних (або водяних) проводів;
- теплота нагрітого повітря частково через укріття втрачається в оточуюче середовище;
- на зовнішній поверхні теплиці ставляться умови вільного теплообміну з навколишнім середовищем.

При побудові математичної моделі і визначенні температурного поля в системі теплиця - навколишнє середовище були прийняті такі спрощення:

- теплиця розглядається як певний об'ємний простір, обмежений світлопрозорою оболонкою, заповнений однорідним газом (повітрям), з нижньої частини об'єм обмежено поверхнею ґрунту;
- ґрунт розглядається як обмежений об'єм термічно однорідної маси;
- втрата теплоти на випаровування вологи (в першому наближенні) відсутня або компенсуються додатковою потужністю ґрунтових нагрівачів;
- поверхні огорожень (стін) теплиці знаходяться в умовах вільного конвективного теплообміну з навколишнім газовим середовищем, знаходиться у спокої (атмосферне повітря).

**Красві умови.** Вважали, що в початковий момент часу температура в теплиці розподілена рівномірно і дорівнює температурі навколишнього середовища. Тобто для початкового розподілу температури виконується умова  $t_0 = t_3$ , де  $t_0$  – температура внутрішнього повітря в приміщенні теплиці, °С;  $t_3$  – температура зовнішня, °С. Граничні умови вибирали з міркувань, що система симетрична. На зовнішній поверхні, граничні умови, згідно прийнятим допущенням, визначалися інтенсивністю тепловідлення в теплиці і теплообміном з навколишнім середовищем. Інтенсивність конвективного теплообміну відкритих ділянок теплиці, які контактують з навколишнім середовищем, визначали коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$ , який пов'язаний з числом Нюссельта  $Nu$  та характеризує конвективний теплообмін (число Нюссельта приймали рівним 0,35...0,36). Враховували, що теплиця знаходиться в умовах природного теплообміну, тобто рух навколишнього середовища обумовлений, перш за все, конвективним відтоком нагрітих шарів середовища, що контактують зі спорудою, ґрунтом, повітрям, рослинами. Окремо розглядали постановку граничних умов на поверхні зіткнення повітря із стінами теплиці. Тут, по суті, здійснюється контакт двох середовищ з різними теплофізичними характеристиками, які відповідають матеріалам

споруди (стін) і повітря. Таким умовам відповідають граничні умови IV-ого роду, що мають на увазі рівність температур і рівність теплових потоків.

**Початкові рівняння.** Поставлене в дослідженнях завдання з врахуванням викладених допущень може бути представлено у вигляді системи рівнянь теплового балансу для: поверхні ґрунту, повітря, світлопроникного огороження і для покриву рослин. Функціональні залежності між температурою повітря в приміщенні теплиці, температурою ґрунту та температурою рослинного покриву визначали системою диференціальних рівнянь:

Рівняння теплового балансу для поверхні ґрунту:

$$J \cdot f + P_{\text{ад}} = (m_{\text{ад}} \cdot \tilde{n}_{\text{ад}} + m_p \cdot \tilde{n}_p) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} + \alpha \cdot f \cdot (\Theta - t). \quad (1)$$

Рівняння теплового балансу для повітря:

$$P_n + \alpha \cdot f \cdot (\Theta - t) = m_n \cdot \tilde{n}_p \cdot \frac{dt}{d\alpha} + \alpha_a \cdot F_c \cdot (t_a - \Theta_c) + \alpha_p \cdot f_p \cdot (f_a - \Theta_p). \quad (2)$$

Рівняння теплового балансу для світлопроникного огороження:

$$m_c \cdot \tilde{n}_c \cdot \frac{d\Theta_c}{d\tau} = \alpha_c^a \cdot F_c^a \cdot (t_a - \Theta_c) - \alpha_c^i \cdot F_i^i \cdot (\Theta_c - t_c). \quad (3)$$

Рівняння теплового балансу для рослин:

$$m_p \cdot \tilde{n}_p \cdot \frac{d\Theta_p}{d\tau} = \alpha_p \cdot f_p \cdot (t_a - \Theta_p), \quad (4)$$

де  $\theta$ ,  $t$ ,  $t_3$  - температури ґрунту, повітря і зовнішнього середовища відповідно, в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_6$  - температура внутрішнього повітря в приміщенні теплиці,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_c$  - температура огорожі,  $\text{кДж} \cdot \text{м}^2$ ;

$\theta_p$  - температура рослинного покриву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$m_c$  - маса огороження (стіни),  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

$m_{\text{гр}}$  - маса ґрунту, кг;

$m_n$  - маса повітря, кг;

$m_p$  - маса рослинного покриву, кг;

$C_{\text{гр}}$  - питома теплоємність гранта,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$C_n$  - теплоємність повітря,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

$C_c$  - питома теплоємність огороження (стіни),  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

$C_p$  - теплоємність рослин,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$P_n, P_{\text{гр}}$  - потужність повітряних і ґрунтових обігрівачів,  $\text{Вт}$ ;

$P_n$  - потужність повітряного обігріву,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$P_{\text{гр}}$  - потужність ґрунтових обігрівачів,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$I$  - інтенсивність освітлення (сонячна радіація - випромінювання),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$R_v$  - вологість повітря, %;

$f$  - поверхні ґрунту,  $\text{м}^2$ ;

$F_c^a$  - поверхня огороження із скла,  $\text{м}^2$ ;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha^b$  - коефіцієнт тепловіддачі від ґрунту та повітря,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$f_n, f_p$  - поверхні повітря та рослини відповідно,  $\text{м}^2$ .

**Вибір методу розрахунку температур.** Рівняння теплового балансу та розподілу температур на поверхні: ґрунту (1), споруд (3), рослин (4) і температур повітря (2) повністю визначає тепловий стан теплиці в просторі і в часі. Зважаючи на

нелінійність коефіцієнтів рівняння, нестационарність і складність постановки граничних умов, можливості аналітичного рішення такої задачі обмежені. Зважаючи на ці причини поставлене завдання вирішувалося чисельно, методом кінцевих різниць [5, 6, 8 - 16]. При вживанні його здійснюється перехід від безперервної області зміни аргументів  $\Theta_p, \Theta, \Theta_c, t$  до звичайно-різницевої просторово-часової сітки з безліччю точок-вузлів  $\Theta_{p,j}, \Theta_j, \Theta_{c,j}$  і  $t_i$ . При розрахунках використовувалася рівномірна прямокутна просторова розрахункова сітка з кроком по радіальній і аксіальній координатах  $\Delta\Theta = \Theta_{j+1} - \Theta_j$ , де  $j=1...N\theta$  і  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ , де  $i=1...Nt$ . Для звичайно-різницевої апроксимації рівнянь (1-4) використовувалася просторова п'ятиточкова різницева схема з двошаровою неявною схемою за часом. Отримані рівняння вирішувалися методом прогону, який комбінували з методом змінних напрямів [8-16]. Стійкість різницевої схеми, яка використовувалася, досліджувалася шляхом зміни кроків сітки, які вибиралися такими, щоб подальше їх зменшення не позначалося на виді отриманого чисельного рішення в межах точності обчислень, що задавалася.

**Комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці. Температурні поля.** Розроблене програмне забезпечення CWTemp для комп'ютерного моделювання теплового стану теплиці, дозволяє в інтерактивному режимі проводити детальні чисельні дослідження і оптимізацію теплових режимів в середовищі, з врахуванням зовнішніх і внутрішніх параметрів, які впливають на температурні поля в теплиці: інтенсивність сонячного випромінювання, вологість, потужність ґрунтових і повітряних обігрівачів, а також на її мікроклімат в цілому. Дане програмне забезпечення може бути використано для прогнозування просторово-часового розподілу температури в системі залежно від її геометричних параметрів, властивостей ґрунту, повітря, рослин, матеріалів огороження (стін), а також технологічних режимів теплиці.

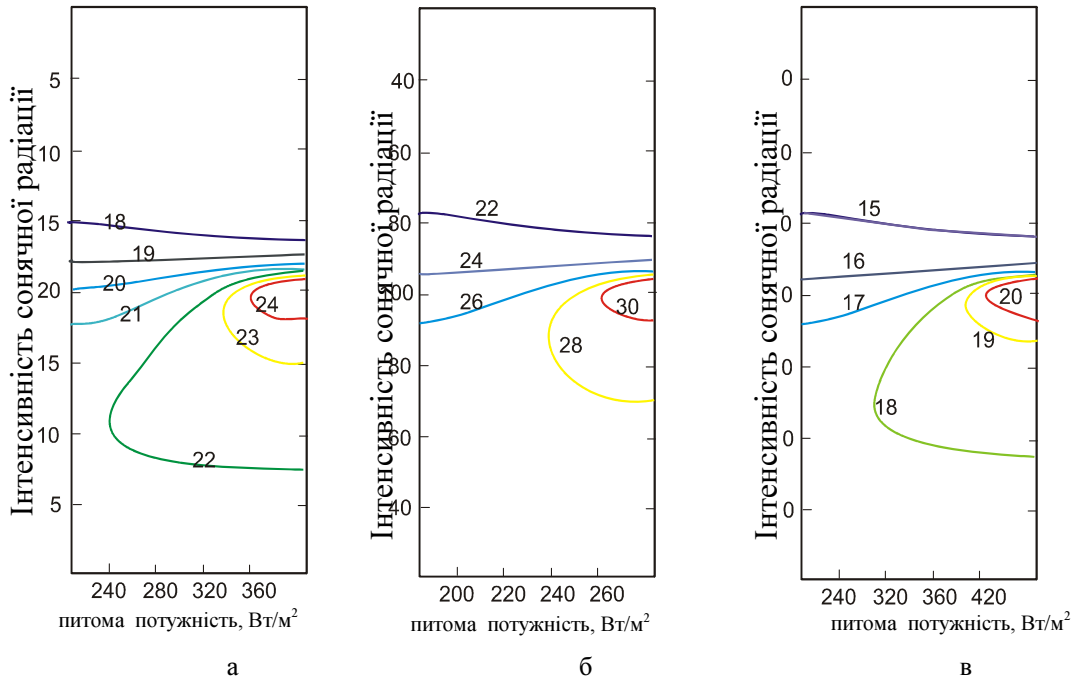
Початкові дані прийняті для моделювання представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Початкові параметри, які характеризують мікроклімат теплиці

Параметри мікроклімату теплиці	Значення
$t_0$ – початкова температура, °С	1 <sup>0</sup> С
$t_3$ – температура зовнішня, °С	-1...-10 °С
$\omega$ – частота коливань, $\pi$	$\pi / 12 \times 3600$
$t_v$ – температура внутрішнього повітря в приміщенні теплиці, °С	18...24 °С
$\theta^0$ – початкова температура ґрунту, °С	1...2 °С
$\theta_c$ – температура огороження, °С	20,95 кДж·м <sup>2</sup>
$\theta_p$ – температура рослинного покриву, °С	$1,05 \cdot 10^3$
$m_p$ – маса рослин, кг	0,9 кг
$m_n$ – маса повітря, кг	$0,3 \text{ м}^3 = 1,24 \text{ кг/м}^3$
$m_{gr}$ – маса ґрунту, кг	1200...1600 кг
$R_n$ – потужність повітряного обігріву, Вт/м <sup>2</sup>	120...500 Вт/м <sup>2</sup> ;
$R_{gr}$ – потужність ґрунтових обігрівачів, Вт/м <sup>2</sup>	100...220 Вт/м <sup>2</sup> ;
$C_{gr}$ – питома теплоємність ґрунту, Дж/кг	$4 \cdot 10^3$ Дж/кг
$C_p$ – теплоємність повітря, Дж/с	$1,05 \cdot 10^3$ Дж/с
$I$ – інтенсивність сонячної радіації, Вт/м <sup>2</sup>	100...200 Вт/м <sup>2</sup>

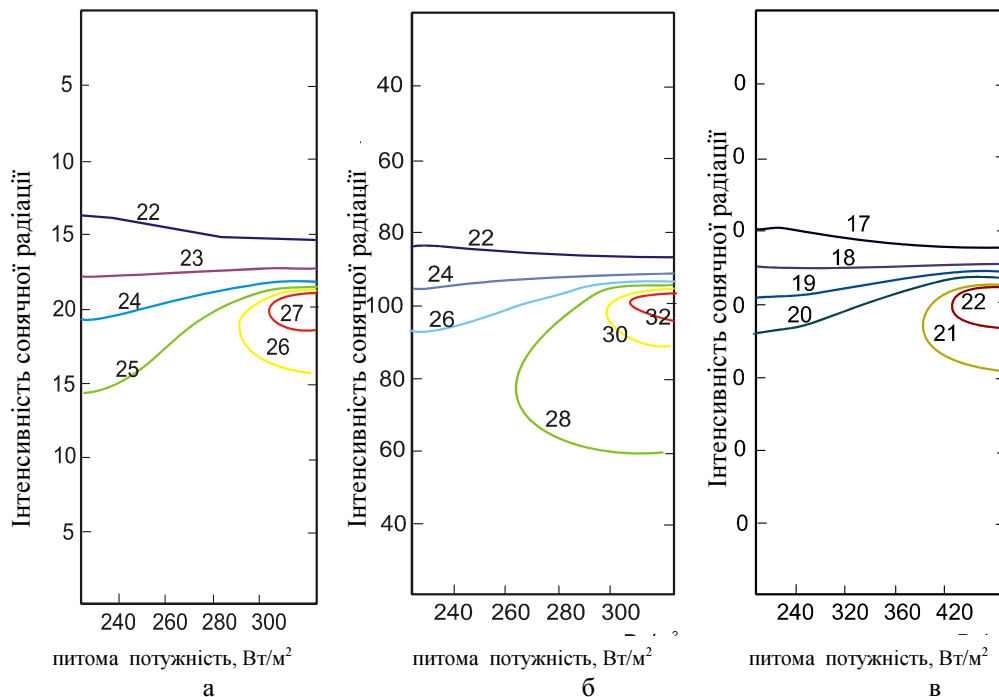
На основі розробленої математичної моделі і створеного програмного забезпечення проведений чисельний аналіз особливостей розподілу температури в

приміщенні теплиці. Результати чисельного аналізу отримані за допомогою програми CWTemp для комп'ютерного моделювання теплового стану теплиці, представлені на рисунках 1 і 2 у вигляді температурних полів, які відображають вплив інтенсивності сонячної радіації, питомої потужності джерела тепла на розподіл температури в ґрунті та повітрі теплиці.



а – похмурий день; б – сонячний день; в - ніч

Рисунок 1 - Вплив інтенсивності сонячної радіації на розподіл температури в ґрунті теплиці і кількості необхідної питомої потужності джерела тепла для розігріву ґрунту до необхідної температури.



а – похмурий день; б – сонячний день; в – ніч

Рисунок 2 - Вплив інтенсивності сонячної радіації на розподіл температури в повітрі теплиці і кількості необхідної питомої потужності джерела тепла для розігріву повітря до необхідної температури.

На рис. 1-2 температурне поле в теплиці, представлене у вигляді системи, навколишнє середовище – огороження – ґрунт, яка змінюється в кожний розрахований момент часу. Поточний тепловий стан теплиці має вигляд ізольованої температури.

### Висновки.

Важливу роль при виборі параметрів мікроклімату в теплиці, їх прогнозуванні в залежності від зовнішніх (сонячне випромінювання, температура довкілля, вологість, матеріал огороження) і внутрішніх факторів (потужність повітряних і ґрунтових нагрівачів) і забезпеченні необхідного діапазону параметрів мікроклімату і його стабільності, грає моделювання температурних полів в теплиці.

Визначення температурних полів в теплиці важливе перш за все тим, що дозволяє вибирати наперед потужність обігрівачів, прослідити і проаналізувати взаємозв'язок інтенсивності сонячної радіації з матеріалом огороження, температурою та вологістю довкілля і на основі цього аналізу прогнозувати значення температур на поверхні ґрунту, рослин, огороження при різних зовнішніх та внутрішніх характеристиках теплиці, що є необхідним для оцінки явищ, що відбуваються в теплиці і визначити температуру в приміщенні теплиці в загалі.

Отримані в результаті математичного та комп'ютерного моделювання залежності теплових процесів в теплиці можуть бути використані при створенні автоматизованих систем управління параметрами їх мікроклімату.

### Список літератури

1. Фаталиев К.Г. Разработка математической модели режимов работы комбинированной системы теплоснабжения пленочных теплиц [Использование солнечной энергии и низкопотенциальной теплоты грунта] Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве / Фаталиев К.Г. канд. техн. наук Гаджиев И.М. Алиев К.И. Гусейнов С.Т. Алиев И.Х. Ибрагимов Н.Т.; отв.ред. Фаталиев К.Г. – М.: Всероссийский научно-исследовательский ин-т электрификации сельского хозяйства, 2008 Ч. 2 Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. - С. 265-270.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен / Лыков А.В. Справочник. М.- 1972. - 560 с.
3. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
4. Куртнер Д.А. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте / Куртнер Д.А., Чудновский А.Ф. - Л., 1969.- 320с.
5. Лыков А.В. Теория тепло - и массопереноса / Лыков А.В., Михайлов Ю.А. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 536с.
6. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / Мак-Адамс В.Х. – М.: Металлургиздат, 1961. – 690 с.
7. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики, 3-е изд / Большев Л.Н., Смирнов Н.В. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
8. Токмаков Н.М. Математическая модель системы управления микроклиматом аграрных теплиц / Токмаков Н.М., Грудинин В.С. Журнал «Гавриш» - 2008. №3. - С. 28-31.
9. Гарбуз В.М., Математичне моделювання теплових процесів в ґрунті теплиць. Математическое моделирование тепловых процессов в почве теплиц / В.М. Гарбуз, А.В. Захаров, Ю.А. Повещенко, С.Б. Попов, Ю.П. Попов.; отв.ред. В.М. Гарбуз.; АН СССР Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша М.: Наука, 2005 - 25с.
10. Грудинин В.С. 2005. Свидетельство об официальной регистрации базы данных. База данных «Климат- компьютер». № 2005620163 от 27.04.05.
11. Корчемний М.О. Моделі температури зовнішнього повітря і ґрунту для розрахунку теплового балансу житлового будинку / Корчемний М.О., Федорейко В.С. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. №1. – С. 86–89.
12. Пустыгин А.Н. Структурные свойства функций одной переменной и операции над ними / Пустыгин А.Н. Вестник ЧГАУ. - 2003. т. 39. – С.25-28.
13. Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача / Вабишевич П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
14. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / Радченко С.Г.: Навч.- метод. посіб. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 88 с.

15. Царенко О.М. Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології/ Царенко О.М., Злобин Ю.А., Скляр В.Г., Панченко С.М. – Суми: „Університетська книга”, 2000. - 203 с.
16. Попов А.Ю. Численный метод расчета аккумулятора скрытой теплоты в теплице/ Попов А.Ю. Экология и с.-х. техника. Северо-Западный НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства г. Санкт-Петербург-Павловск, п.о. Тярлево. – СПб - Павловск, 2000 Т.3. - С. 52-58.

*Л.Вихрова, В.Калич, Т.Прокопенко*

**Математическое и компьютерное моделирование распределения температур в теплице для создания системы управления**

На основе разработанной математической модели и созданного программного обеспечения проведен численный анализ особенностей распределения температуры в помещении теплицы. Моделирование компьютерных температурных полей важно при прогнозировании параметров микроклимата теплицы в зависимости от внешних и внутренних факторов и обеспечении их необходимого диапазона и стабильности.

*L.Vikhrova, V. Kalich, T. Prokopenko*

**A mathematical and computer design of distributing of temperatures is in a hothouse**

On the basis of the developed mathematical model and created software an analysis of features of distributing of temperature was conducted numeral in the apartment of hothouse. The design of the computer temperature fields is important at prognostication of parameters of microclimate of hothouse depending on external and internal factors and providing of their necessary range and stability.

Одержано 07.04.11

**УДК 681.513;62.505;621.9.04**

**В.А. Зозуля, доц., канд. техн. наук, С.І. Осадчий, доц., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Аналіз методів орієнтації та позиціонування багатокординатних рухомих об'єктів з механізмом паралельної структури**

В статті описано дослідження методів орієнтації та позиціонування об'єктів з механізмом паралельної структурою. Зроблено аналіз наукових робіт пов'язаних з використанням різновиду теорії механізмів - теорії гвинтів та кватерніонів, для визначення миттєвих переміщень виконавчого органу пристроїв платформеного типу. Наведені переваги та недоліки різних підходів визначення миттєвих значень. Зроблено загальний висновок, що до використання математичного апарату механіки паралельних структур з врахуванням постановки завдання позиційного управління на підставі теорії оптимального управління рухомих об'єктів.

**механізм паралельної структури, гексапод, маніпулятор, кінематика, теорія гвинтів, позиційне управління**

**Вступ.** В даний час у машинобудуванні актуальною є задача розробки технологічних машин для виконання механічної обробки поверхонь складної форми. У авіабудуванні необхідні машини для організації різних випробувань динаміки польотів літальних апаратів. Зазвичай для вирішення перерахованих завдань використовуються багатоланкові важільні маніпулятори або гнучкі маніпулятори.