

УДК 004.942:697.245

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/22>**Дудкін К.В.**

ТОВ «КВ-автоматизація»

Гродов В.Ф.

ПЗВО «Дніпровський технологічний університет ШАГ»

Дубровський С.С.

ПЗВО «Дніпровський технологічний університет ШАГ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ НИЗЬКОЇ ТЕПЛИЦІ З ТРУБЧАСТИМИ ГАЗОВИМИ НАГРІВАЧАМИ НА ПЕЛЕТАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБІГРІВУ

Розглядається система опалення низької теплиці. Для опалення використовується трубчастий газовий нагрівач, який розташовується на нульовому рівні всередині теплиці. У якості палива використовуються паливні гранули – пелети з деревини. В результаті аналізу останніх досліджень і публікацій показано, що традиційно для опалення теплиць застосовуються системи опалення з розташуванням інфрачервоних нагрівачів у верхніх зонах простору теплиці. Такий підхід неможливий при опаленні низьких теплиць, тому що променистий тепловий потік буде перевищувати допустиме значення по санітарних нормам. Вихід з цього становища – розташувати трубчасті нагрівачі на нульовому рівні і зменшити можливе випромінювання початкової ділянки трубчастого нагрівача, використовуючи теплову ізоляцію цієї ділянки. Це нове технічне рішення потребує відповідного експериментального підтвердження. Ціллю даної роботи є викладення результатів експериментального дослідження теплового режиму всередині теплиці по площі та внутрішньому простору теплиці у реальних умовах експлуатації системи опалення в опалювальний період. Передбачається, що результати експериментального дослідження теплового режиму дозволять перейти до розробки адекватної математичної моделі системи опалення низької теплиці з трубчастими газовими нагрівачами на пелетах. Для експериментального дослідження вибрана низька теплиця з трубчастим газовим нагрівачем, що працює на пелетах. Розміри теплиці у плані 21 м на 7 м, зовнішнє покриття виконане з полікарбонату. Система автоматичної подачі пелет регулювала потужність системи опалення від 10 до 40 кВт, яка здійснювалось від датчика температури повітря всередині теплиці. При дослідженні вимірялися температури у різних точках на плані теплиці і у різних точках по висоті теплиці. На плані теплиці були вибрані 9 точок, і для кожної з яких вимірялися температури повітря у трьох точках по висоті теплиці, всього – 27 точок виміру температури внутрішнього повітря. Встановлено, що незважаючи на нерівномірність виділення тепла від трубчастого нагрівача по його довжині температурне поле по різних зонах всередині теплиці має досить рівномірний характер. А також встановлено, що для невисокої теплиці при застосуванні трубчастого газового нагрівача, розташованого на нульовому рівні по периметру теплиці, забезпечує рівномірне поле температури по висоті теплиці. Середнє арифметичне коливання температури по висоті теплиці в окремих зонах лежить у межах 0,04–0,11 градусів за Цельсієм. Експериментальне дослідження показало, що головна задача математичного моделювання системи опалення низької теплиці потребує математичного моделювання трубчастого газового нагрівача на пелетах. Наведені основні складові відповідного математичного моделювання як математичної моделі гідравлічного ланцюга з розподіленими параметрами.

Ключові слова: низька теплиця, трубчастий газовий нагрівач на пелетах, експериментальні дослідження, температурний режим, математичне моделювання, гідравлічні ланцюги з розподіленими параметрами.

Постановка проблеми. Використання відновлювальних джерел енергії – актуальний напрямок розвитку теплоенергетики. Особливо привабливаним є використання паливних гранул (пелет)

для опалення теплиць. Відомо багато технічних рішень для систем опалення теплиць, в тому числі при використанні природного або зрідженого газу. Серед таких рішень – використання приладів

інфрачервоного газового обігріву, що можливо застосовувати для опалення достатньо високих теплиць, але не можливо застосовувати для низьких теплиць через порушення санітарних вимог. Нові технічні рішення для опалення низьких теплиць – трубчасті газові нагрівачі, що працюють на пелетах і розташовуються на нульовому рівні по периметру теплиці. Для таких систем було невідомо, чи забезпечується якісне опалення і раніше не були розроблені математичні моделі для систем опалення низьких теплиць з трубчастими газовими нагрівачами на пелетах. Для вирішення поставлених задач необхідно експериментальне дослідження теплового режиму низької теплиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі технічні рішення з застосуванням інфрачервоного обігріву теплиць [1]. При цьому обігрівачі розташовуються на достатньої висоті всередині високих теплиць. Аналогічне розташування розглядалось при аналізі методів розрахунку систем інфрачервоного опалення. Узагальнений підхід до моделювання та розрахунку теплового балансу сонячних теплиць з урахуванням внутрішніх теплових потоків можна знайти в [2]. Нові технічні рішення дали можливість використовувати пелети в системах опалення теплиць в тому числі з трубчастими газовими нагрівачами [3–6]. Але дослідження теплового режиму всередині низької теплиці при застосуванні системи опалення з трубчастими газовими нагрівачами на пелетах раніше не виконувалось. Математичне моделювання трубчастих газових нагрівачів, в тому числі на пелетах, представлено у результатах [6], ці результати, а також [7–9] можна бути врахувати при розробці математичної моделі системи опалення низької теплиці з трубчастими газовими нагрівачами на пелетах.

Метою статті є викладення результатів експериментального дослідження теплового режиму всередині теплиці по площі та внутрішньому простору теплиці у реальних умовах експлуатації системи опалення в опалювальний період, та на основі цього розробка адекватної математичної моделі системи опалення низької теплиці з трубчастими газовими нагрівачами на пелетах.

Виклад основного матеріалу. Розроблена конструкція трубчастого газового нагрівача на пелетах досліджувалась у лабораторних умовах і на реальному об'єкті. У якості реального об'єкту застосування вибрана система теплопостачання теплиці у м. Дніпропетровськ. Розміри теплиці у плані 21 м на 7 м, зовнішнє покриття виконане з полікарбонату. Для теплопостачання теплиці був запроєктований вузол розміщення пелетного пальника з оперативним бункером для пелет і системою автоматичної подачі пелет для регулювання потужності системи теплопостачання від 10 до 40 кВт. Регулювання потужності теплопостачання здійснювалось від датчики температури повітря всередині теплиці.

При експериментальному дослідженні визначались наступні параметри: теплова потужність пальника, витрата газоповітряної суміші і припливного повітря, температури на зовнішній поверхні трубчастого нагрівача по його довжині. Для основного досліджуваного режиму $Q = 20$ кВт, $V = 320$ м³/год. Діаметр трубчастого нагрівача 150 мм, товщина стінки сталевих труби – 3 мм на початковій ділянці довжиною 18 м і 0,55 мм на подальшій довжині нагрівача від 18 м до 48 м.

Виконувалось дослідження температурного режиму у низьких теплицях з розробленими трубчастими газовими нагрівачами. Наведемо результати дослідження температурного режиму

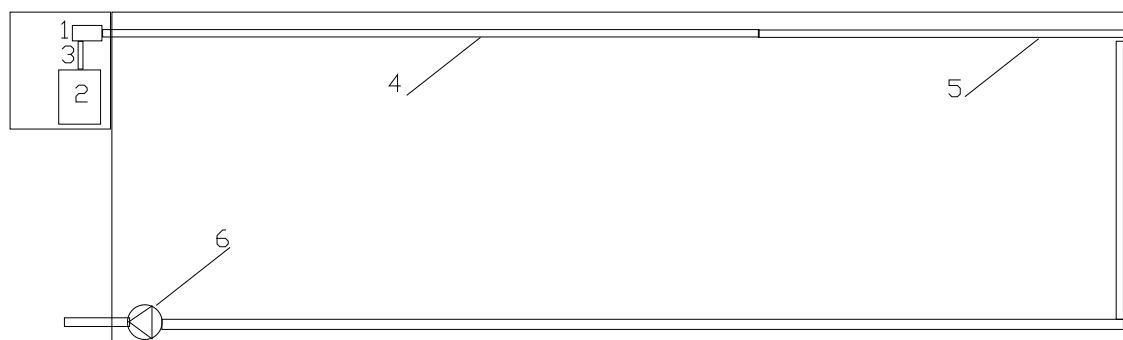


Рис. 1. План теплиці з трубчастим газовим нагрівачем на пелетах: 1 – газовий пальник з вузлом газифікації пелет; 2 – оперативний бункер для пелет; 3 – лінія автоматичної подачі пелет; 4 – початкова ділянка нагрівача (18 м); 5 – П-образна ділянка нагрівача (30 м); 6 – витяжний вентилятор

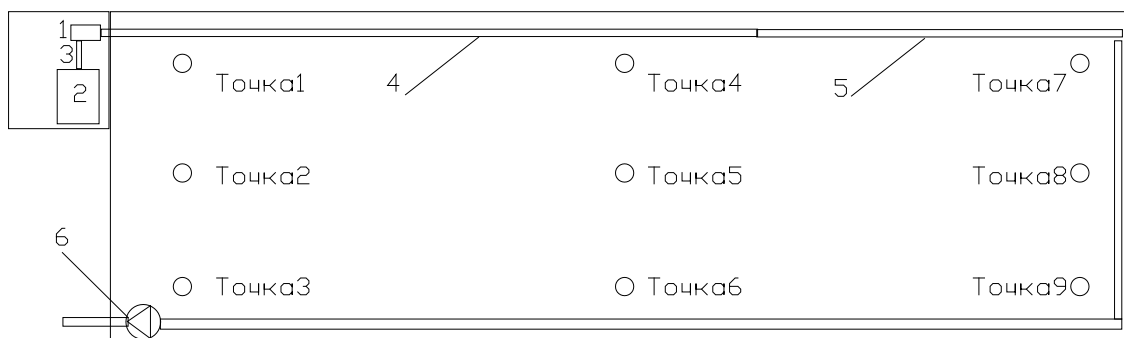


Рис. 2. План теплиці з розташування зон виміру температури внутрішнього повітря (точки 1–9):
 1 – газовий пальник з вузлом газифікації пелет; 2 – оперативний бункер для пелет;
 3 – лінія автоматичної подачі пелет; 4 – початкова ділянка нагрівача (18 м);
 5 – П-образна ділянка нагрівача (30 м); 6 – витяжний вентилятор

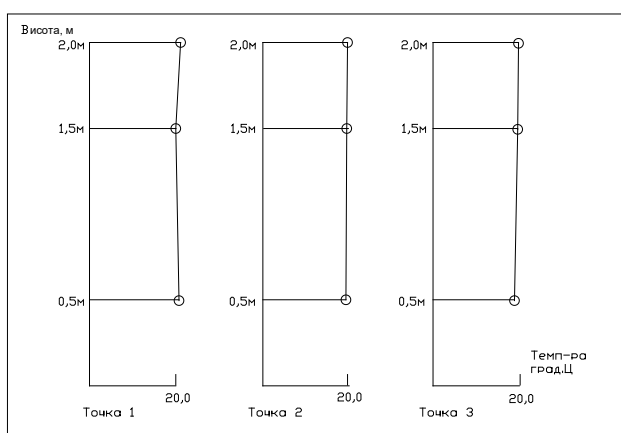


Рис. 3. Розподіл температури внутрішнього повітря у зонах 1–3 по висоті теплиці

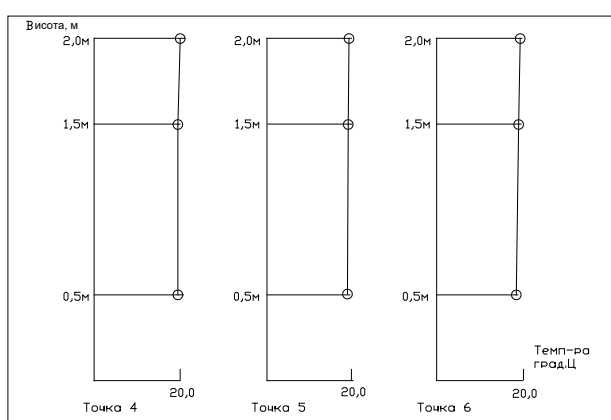


Рис. 4. Розподіл температури повітря у зонах 4–6 по висоті теплиці

у теплиці з трубчастим газовим нагрівачем, що працює на пелетах.

На рис. 2 – план низької теплиці, для якої досліджувались температурні режими. У якості прикладу наведемо режим при таких даних:

Температура зовнішнього повітря $+3,7^{\circ}\text{C}$, початкова температура всередині теплиці $+8,3^{\circ}\text{C}$. Теплова потужність нагрівача – 24 кВт.

При дослідженні вимірялися температури у різних точках на плані теплиці і у різних точках по висоті теплиці. На плані теплиці були вибрані 9 точок, розташування яких наведені на рис. 5.6, і для кожної з яких вимірялися температури повітря у трьох точках по висоті теплиці: 0,5 м, 1,5 м, 2,0 м, всього – 27 точок виміру температури внутрішнього повітря.

С початку роботи трубчастого газового нагрівача після 25 хвилин його роботи встановився практично стаціонарний температурний режим, який характеризується досить рівномірними значеннями температури як у різних точках на плані так і по висоті теплиці.

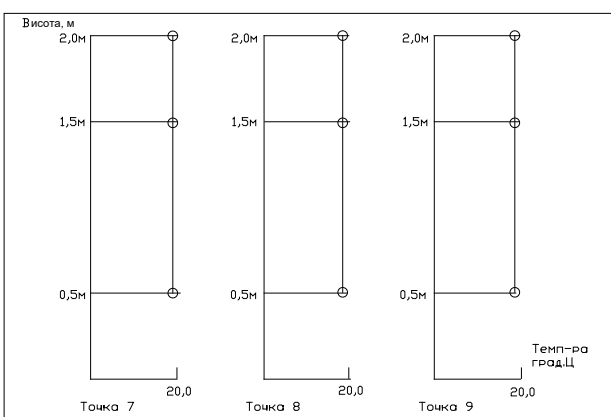


Рис. 5. Розподіл температури повітря у зонах 7–9 по висоті теплиці

Значення температури внутрішнього повітря використані для побудови діаграм розподілу температури, що наведені на рис. 3–5.

З аналізу розподілу температури на плані теплиці та по висоті теплиці (рис. 5.7–5.9) можна зробити висновки:

1. Незважаючи на нерівномірність виділення тепла від трубчастого нагрівача по його довжині температурне поле по різних зонах всередині теплиці має досить рівномірний характер. **Середня температура по різних зонах коливається у межах: 19,2 – 20,1 С** і по різних зонах має вигляд матриці середніх температур (у градусах Цельсія):

Точка 1 – 20,1 Точка 2 – 19,27 Точка 3 – 19,23
Точка 4 – 19,77 Точка 5 – 19,33 Точка 6 – 19,3
Точка 7 – 19,4 Точка 8 – 19,2 Точка 9 – 19,23

2. Для невисокої теплиці при застосуванні трубчастого газового нагрівача, розташованого на нульовому рівні по периметру теплиці забезпечує рівномірне поле температури по висоті теплиці. **Середнє арифметичне коливання температури по висоті теплиці в окремих зонах лежить у межах 0,04 – 011 С** і має вигляд матриці коливань температури (у градусах Цельсія):

Точка 1 – 0,07 Точка 2 – 0,09 Точка 3 – 0,11
Точка 4 – 0,09 Точка 5 – 0,04 Точка 6 – 0,07
Точка 7 – 0,0 Точка 8 – 0,0 Точка 9 – 0,04

Математична модель системи обігріву низької теплиці можна представити у вигляді стаціонарної математичної моделі з урахуванням таких основних процесів:

1. Процес руху та теплообміну газоповітряної суміші всередині трубчатої ділянки нагрівача.
2. Процес теплопередачі від трубчатої поверхні нагрівача до повітря всередині теплиці.
3. Процес теплопередачі від повітря всередині теплиці до повітря оточуючого теплицю середовища.

Математична модель системи обігріву теплиці, перш за все, складається з математичної моделі газового трубчастого нагрівача на пелетах, яка включає наступне.

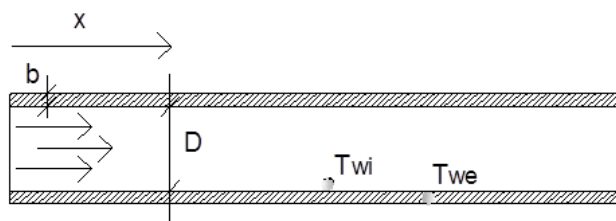


Рис. 6. Схема ділянки трубчастого газового нагрівача

T_o – температура повітряного середовища в теплиці; T_{wi} – температура внутрішньої поверхні стінки; T_{we} – температура зовнішньої поверхні стінки; b – товщина стінки

Основні рівняння математичної моделі можна представити таким чином.

Рівняння руху:

$$dP = -\frac{\lambda}{D} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \cdot dx + g(\rho_0 - \rho) \cdot dh$$

λ – коефіцієнт гідравлічного опору. $\lambda = f(Re)$, де: $Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдсу; $\frac{\rho \cdot \omega^2}{2}$ – швидкісний напір; dP – зміна тиску завдяки руху; ρ_0 – густина повітря у навколишньому середовищі; ρ – густина газоповітряної суміші всередині жарової труби;

dx – приріст координати вздовж жарової труби;

dh – приріст висоти підйому труби; $h = h(x)$ – висота підйому труби.

Рівняння збереження маси:

$$\rho \omega F = M = const$$

Рівняння стану (рівняння ідеального газу):

$$P = \rho RT$$

Рівняння теплообміну:

$$dQ_1 = \alpha_1 \cdot \pi D \cdot dx (T - T_{wi})$$

$$dQ_2 = EC \cdot \pi D \cdot dx (T^4 - T_{wi}^4)$$

$$dQ_3 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \pi D \cdot dx (T_{wi} - T_{we})$$

$$dQ_4 = \alpha_2 \cdot \pi D \cdot dx (T_{we} - T_o)$$

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ_3 = dQ_4$$

$$\rho \omega F C_p dT = -dQ_4$$

dQ_1 – тепловий потік від суміші до стінки труби, який передається конвекцією (завдання руху пару та повітря); dQ_2 – тепловий потік від суміші до стінки труби, передається випромінюванням. CO_2, H_2O – поглинають добре і випромінюють. Якщо є CO_2, H_2O , то ступінь чорноти $\epsilon \neq 0$, її можна розраховувати. dQ_3 – тепловий потік від суміші до стінки труби, передається теплопровідністю від внутрішньої поверхні стінки до зовнішньої; dQ_4 – тепловий потік від зовнішньої поверхні стінки до оточуючого простору теплиці;

Поєднання математичної моделі трубчастого газового нагрівача з математичними моделями обігріву повітря всередині теплиці та математичної моделі теплообміну та теплопередачі від внутрішнього повітря теплиці до навколишнього середовища – це задача наступних досліджень.

Висновки:

1. Експериментальне дослідження температурного режиму всередині низької теплиці при розташуванні трубчастого газового нагрівача на нульовому рівні по периметру теплиці виявило, що температурне поле внутрішнього повітря характеризується рівномірністю як по зонам на плані теплиці, так і по висоті теплиці.

2. Математична модель системи обігріву низької теплиці з урахуванням результатів експериментального дослідження повинна бути стаціонарною і не обов'язково враховувати геометрію розміщення трубчастого газового нагрівача на пелетах на нульового рівні всередині теплиці.

Список літератури:

1. Болотських М.М. Інфрачервоний обігрів теплиць за допомогою електричних довгохвильових нагрівачів панелей / М.М. Болотських // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 9 (140). – С. 43–52.
2. Khalimov, A.G., Khairiddinov, B.E., Kim, V.D. *et al.* Modeling the heat balance of a solar greenhouse with a passive heat accumulator. *Appl. Sol. Energy* **49**, 211–214 (2013). <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040063>
3. Дудкін К.В. Повітряно-водяна система теплопостачання теплиць з трубчастими газовими нагрівачами / К.В.Дудкін, В.В.Ткачова В.В. Данішевський // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8 (63) -2013.- pp. 57-60.
4. Irodov V., Shaptala M., Dudkin K., Shaptala D., Prokofieva H. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tabular heaters// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 3/8 (111) 2021. pp. 50– 59. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235837.
5. Irodov V.F., Shaptala M.V., Dudkin K.V., Shaptala D.E., Chirin D.A. Decision-making at evolutionary search during limited number of fuzzy experiments with multiple criteria // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2022. – No 1 – P.167–175. DOI 10.15588/1607-3274-2022-1-17
6. Математичне моделювання та оптимізація теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами : навчальний посібник / В. Ф. Іродов, С. С. Дубровський, К.В. Дудкін; під ред. В.Ф. Іродова. – Дніпро : ПрВНЗ ДТУ «ШАГ», 2022. – 120 с.
7. Дудкін К.В. Експериментальне дослідження роботи початкової ділянки трубчастого газового нагрівача / Дудкін К.В., Ткачова В.В. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.- Д.: ПДАБА, 2013.- №6.- С.4-6.
8. Irodov V. F., Barsuk R. V. Decision-making Limited Number of Experiments With Multiple Criteria, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2020, No. 1, pp. 200–208. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-20>
9. Irodov V.F., Shaptala M.V., Dudkin K.V., Shaptala D.E., Chirin D.A. Decision-making at evolutionary search during limited number of fuzzy experiments with multiple criteria // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2022. – No 1 – P.167–175. DOI 10.15588/1607-3274-2022-1-17.

Dudkin K.V., Irodov V.F., Dubrovskiy S.S. EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL REGIME OF A LOW GREENHOUSE WITH TUBULAR GAS HEATERS ON PELLETS FOR THE CREATION OF A MATHEMATICAL HEATING MODEL

The heating system of a low greenhouse is considered. For heating, a tubular gas heater is used, which is located at zero level inside the greenhouse. Fuel pellets are used as fuel – wood pellets. As a result of the analysis of the latest research and publications, it is shown that heating systems with the location of infrared heaters in the upper zones of the greenhouse space are traditionally used for heating greenhouses. This approach is impossible when heating low greenhouses, because the radiant heat flow will exceed the permissible value according to sanitary standards. The way out of this situation is to place the tubular heaters at the zero level and reduce the possible radiation of the initial section of the tubular heater, using thermal insulation of this section. This new technical solution needs appropriate experimental confirmation. The purpose of this work is to present the results of an experimental study of the thermal regime inside the greenhouse on the area and internal space of the greenhouse in real conditions of operation of the heating system during the heating period. It is assumed that the results of the experimental study of the thermal regime will allow to proceed to the development of an adequate mathematical model of the heating system of a low greenhouse with tubular gas heaters on pellets. A low greenhouse with a tubular gas heater working on pellets was chosen for the experimental study. The dimensions of the greenhouse in plan are 21m by 7m, the outer covering is made of polycarbonate. The automatic pellet supply system regulated the power of the heating system from 10 to 40 kW, which was controlled by air temperature sensors inside the greenhouse. During the study, temperatures were measured at different points on the plan of the greenhouse and at different points along the height of the greenhouse. On the plan of the greenhouse, 9 points were selected, and for each of them air temperatures were measured at three points along the height of the greenhouse, a total of 27 points of internal air temperature measurement. It was established that despite the unevenness of heat release from the tubular heater along its length, the temperature field in different zones inside the greenhouse has a fairly uniform character. And it was also found that for a low greenhouse, when using a tubular gas heater located at the zero level along the perimeter of the greenhouse, it provides a uniform temperature field along the height of the greenhouse. The average arithmetic temperature fluctuation along the height of the greenhouse in individual zones lies within 0.04–0.11 degrees Celsius. An experimental study showed that the main task of mathematical modeling of the heating system of a low greenhouse requires mathematical modeling of a tubular gas heater on pellets. The main components of the corresponding mathematical modeling as a mathematical model of a hydraulic chain with distributed parameters are given.

Key words: low greenhouse, tubular gas pellet heater, experimental studies, temperature regime, mathematical modeling, hydraulic circuits, distributed parameters.