

УДК 620.97

ВИПРОБУВАННЯ ПІЛОТНОЇ УСТАНОВКИ ҐРУНТОВОГО РЕГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕПЛИЦЬ

Бошкова І.І.¹, доктор техн. наук, Волгушева Н.В.², канд. техн. наук, Мукмінов І.І.³, аспірант, Альтман Е.І.⁴, канд. техн. наук

¹професор, boshkova.irina@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0001-5989-9223>;

²доцент, natvolgusheva@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>,

³fatalrew@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0002-3674-9289>,

⁴доцент, ella@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-64544-2819>

Одеська національна академія харчових технологій, Канатна, 112, Одеса, 65012, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.11>

Проведено аналіз експериментальних залежностей зміни температур повітря і гранульованої насадки регенеративного ґрунтового теплообмінника від часу протягом доби. Визначені значення коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну і теплового потоку в період нагріву. Сформульовано рекомендації щодо удосконалення конструкції ґрунтового регенератора для теплиць.

Проведен анализ экспериментальных зависимостей изменения температур воздуха и гранулированной насадки регенеративного ґрунтового теплообменника от времени в течение суток. Определены значения коэффициента межкомпонентного теплообмена и теплового потока в период нагрева. Сформулированы рекомендации по улучшению конструкции ґрунтового регенератора для теплиц.

An analysis of the experimental dependences of the change in the temperatures of air and granular nozzle of a regenerative soil heat exchanger on time during the day has been carried out. The values of the coefficient of intercomponent heat transfer and heat flux during the heating period has been determined. Recommendations for improving the design of a soil regenerator for greenhouses are formulated.

Бібл.12, рисунків 5.

Ключові слова: гранульована насадка, повітряний потік, температурні криві, ізоляція, коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну, тепловий потік.

Аналіз стану питання термостабілізації теплиць і актуальність розробки ґрунтового теплообмінника

В даний час посилюється пошук ефективних акумуляторів сонячної енергії для обігріву теплиць в умовах значного добового перепаду температур [1-3]. Необхідний температурний рівень в теплицях можна підтримувати за допомогою застосування регенеративного теплообмінного апарату з гранульованої насадкою, для якого джерелом теплоти є сонячне випромінювання. Відомо, що повітря в теплицях в весняний період в регіонах з помірним кліматом в денний час інтенсивно нагрівається від сонячного випромінювання, а в нічний через перепад температур істотно охолоджується. Це визначає раціональність розробки регенератора, здатного акумулювати теплоту днем і використовувати її для обігріву внутрішнього об'єму теплиці вночі. На даний час визначено, що в якості матеріалу для акумуляції теплоти доцільно застосовувати щільний шар гранульованих (сипких) матеріалів [4-5]. В [6] наведені ре-

зультати аналізу трьох способів обігріву теплиць: з використанням гріючих труб на ґрунті, з використанням підігрівачів повітря і комбінований на їх основі. Показано, що використання комбінованої системи є більш сприятливим, так як поліпшується мікроклімат теплиці і запобігаються появи конденсату на пластикових плівках. Однак застосування цих способів вимагають великих витрат енергії на нагрів. В роботі [7] для зниження енергетичних витрат запропоновано використовувати систему сонячних колекторів. Дослідження показали, що відповідна модернізація традиційних теплиць дозволяє заощадити до 70% енергії. Автори стверджують, що необхідні роботи з математичного моделювання та проектування оптимальної форми сонячної теплиці для всіх сільськогосподарських районів. Це дозволить отримати максимальну сонячну радіацію і зменшити потребу в викопному паливі. В роботі [8] представлені результати експериментального дослідження енергетичного балансу теплиці без підігріву в умовах жаркого і посушливо-

го клімату. Показано, що ґрунт в теплиці є важливим джерелом тепла в нічний час і може забезпечити приблизно до 44.03 Вт/м^2 при значній добовій ізоляції. У порівнянні з системою штучного опалення, яка вимагає приблизно 78 Вт/м^2 , таке джерело тепла буде достатнім для підтримки температури повітря в теплиці між 15°C і 18°C . Проте наведені результати розрахунків застосовні для умов проведення експериментів, тобто в регіоні Середземноморського басейну. Також залишається питання, як ефективно відводити теплоту від ґрунту в нічний час. Основна проблема, що гальмує використання всього потенціалу природних і поновлюваних джерел енергії, сформульована в роботі [9], а саме: застосування сонячної енергії в системах обігріву і охолодження приміщень неможливо без розробки економічно конкурентоспроможних і надійних засобів для акумулювання теплоти. Перспективи акумулювання сонячної теплової енергії розглядалися авторами [10], при цьому основна увага приділяється насипному і киплячому шару твердих часток. Встановлено, що щільні шари мають основну перевагу в низькотемпературних системах накопичення енергії. Важливим питанням є вибір матеріалу для акумулювання теплової енергії. Дослідження теплопереносу в щільних шарах [11] дозволили зробити висновки, що при виборі гранульованого матеріалу для накопичення теплової енергії число Біо має бути якомога нижче. В цьому випадку тепловий опір всередині твердого тіла не є визначальним.

Аналіз літературних даних [9-11] свідчить, що розробка регенераторів з щільними шарами гранульованих матеріалів сприяє розвитку енергозберігаючих систем нагрівання та охолодження. У той же час необхідні додаткові знання про теплообмін між потоком газу і твердими частинками в теплообмінному каналі ґрунтового регенератора. Актуальність розробки ґрунтових регенераторів визначається необхідністю економії енергетичних ресурсів на обігрів теплиць. Дослідження в цій області призначені для створення економічно вигідних і технічно раціональних теплообмінних пристроїв для підтримки потрібного температурного рівня в теплицях.

Мета та завдання роботи

Метою роботи є визначення працездатності ґрунтового регенератора для теплиці при випробуванні пілотної установки в натурних умовах. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- визначити за температурними кривими, одержуваних експериментальним шляхом, період нагріву насадки і тепловий потік, який передається від повітря,

- оцінити коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну в період нагріву;

- обґрунтувати раціональність вибору матеріалу для гранульованої насадки;

- виробити рекомендації щодо поліпшення конструкції ґрунтового регенератора для промислового використання.

Конструктивні особливості ґрунтового тепличного регенератора

Для зручності масштабування регенеративного ґрунтового теплообмінника створена його модель у вигляді пілотної установки, яка дозволяє визначити в натурних умовах, наскільки ефективно здійснюється теплообмін між гранульованою насадкою і потоком повітря. Основний елемент ґрунтового регенератора – ізолюваний теплообмінний канал, заповнений гранульований матеріалом, який заглиблений під ґрунтом теплиці. Габаритні розміри виготовленої пілотної установки наступні: внутрішній діаметр теплообмінного каналу (труби з полівінілхлориду) – 10 см., товщина стінки – 5 мм, довжина кагалу – 1 м, товщина ізоляції (спінений поліетилен, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,035 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$) – 0,8 см, висота корпусу теплиці – 1,5 м., висота вхідного повітряповода – 1 м, висота вихідного повітряповода – 50 см. Гранульована насадка являє собою щільний шар щебеню, що заповнює теплообмінний канал, маса якого становила 15,5 кг. Об'єм макета теплиці, що бере участь в експерименті, становив $V=0,3 \text{ м}^3$. Схема ґрунтового регенеративного теплообмінника в складі теплиці приведена на рис. 1.

Конструкція ґрунтового регенератора складається з теплообмінного каналу, заповненого гранульованим матеріалом та покритим шаром ізоляції, вхідного та вихідного повітропроводів, з установленим на виході витяжним каналним вентилятором. Теплообмінний канал з теплоізоляцією розташований під ґрунтом теплиці. Повітропроводи ґрунтового регенератора знаходяться під світлопрозорим корпусом з можливістю забезпечити циркуляцію повітря внутрішнього простору теплиці, проходячи через теплообмінний канал. Теплообмінний канал покритий теплоізоляцією. Установка обладнана датчиками температур, що зв'язані з комп'ютером, який безперервно отримує відповідні дані.

Ґрунтовий регенератор функціонує наступним чином. При досягненні температури повітря в теплиці, що нагрівається, в умовах надходження сонячної енергії у внутрішній простір теплиці через світлопрозорий корпус, на рівні 38°C , вмикається витяжний каналний

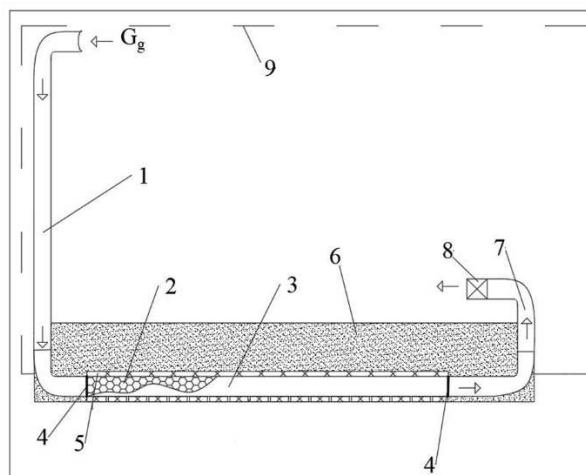


Рис. 1. Схема ґрунтового регенератора для теплиць:

1 – гранульований матеріал, 2 – теплообмінний канал, 3 – вхідний повітропровід, 4 – сітчасті перегородки, 5 – ізоляція, 6 – ґрунт теплиці, 7 – вихідний повітропровід, 8 – каналний вентилятор, 9 – світлопрозорий корпус теплиці

вентилятор, розташований у вихідному повітропроводі. Починається період нагрівання. Тепле повітря по вхідному повітропроводу надходить в теплообмінний канал, в якому здійснюється контактний теплообмін між потоком повітря та частками гранульованого матеріалу. Для утримання акумульованої шаром гранульованого матеріалу теплоти теплообмінний канал покритий теплоізоляцією. При зниженні температури повітря в теплиці до граничного відносно рекомендованих для рослин, що вирощуються в теплиці, регенератор переходить в період охолодження. Вентилятор вмикається та повітря з внутрішнього простору теплиці починає рух, проходячи вхідний повітропровід, теплообмінний канал та вихідний повітропровід. Проходячи через шар гранульованого матеріалу, повітря нагрівається і температура в теплиці підвищується.

Методика експериментального дослідження ґрунтового регенератора

Для оцінки функціональних можливостей роботи ґрунтового регенератора передбачено вимір температур повітря і гранульованого матеріалу (щебін) в процесі його роботи. Схема вимірювань представлена на рис. 2. З інтервалом 10 с на комп'ютер надходили значення температури повітря на вході і виході з теплообмінної ділянки, а також шару щебеню по довжині гранульованої насадки: на вході, в середині і на виході, за використання термопар ТЕР-2. Швидкість повітря в незаповненому перетині каналу вимірювалася термоанемометром. Після того, як температура повітря на виході починає

перевищувати температуру повітря на вході, вентилятор вимикається. Вимірювання температури повітря і частинок в шарі проводяться до закінчення повного часу експерименту, відповідного 24 годинам.

За результатами вимірювань температур проводилися теплові розрахунки і проводилася оцінка ефективності роботи ґрунтового регенератора в складі теплиці.

Методика обробки експериментальних даних

За отриманими експериментальним значенням температур визначалися тепловий потік, середньологаріфмічний температурний напір і коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну. Тепловий потік, який передається від повітря гранульованої насадки Q_b , визначається залежністю (1):

$$Q_b = G_g \cdot c_p \cdot \delta t_g, \quad (1)$$

де $\delta t_g = t_g' - t_g''$ – різниця температур повітря на вході і виході теплообмінного каналу, G_g – витрата повітря, c_p – його середня теплоємність.

Оцінка коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну проводилася по залежності (2):

$$\alpha = \frac{Q_b}{F_m \cdot \Delta t_{\log}}, \quad (2)$$

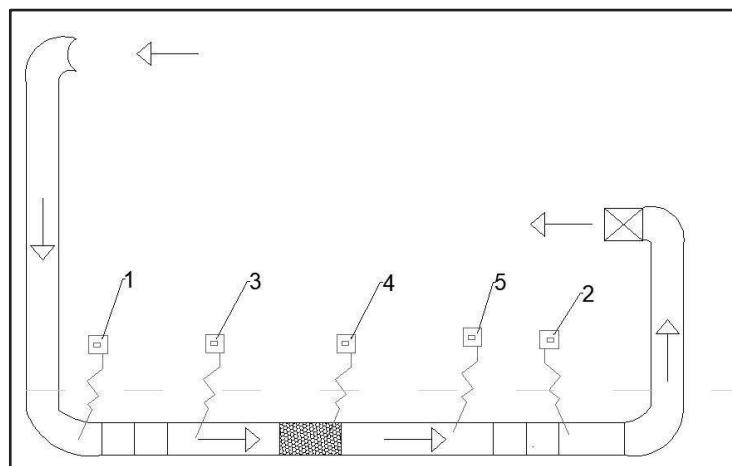


Рис. 2. Схема вимірювань температур в ґрунтовому регенераторі:

1 – температура повітря на вході теплообмінного каналу, 2 – температура повітря на виході з теплообмінного каналу, 3 – температура шару гранульованого матеріалу на вході в теплообмінний канал, 4 – температура шару гранульованого матеріалу в середині каналу, 5 – температура шару гранульованого матеріалу на виході

де F_m – площа поверхні частинок, що беруть участь в теплообміні, $\Delta t_{\log}$ – середньоарифмічний температурний напір, який визначається залежністю (3):

$$\Delta t_{\log} = \frac{(t'_g - t'_m) - (t''_g - t''_m)}{\ln \frac{(t'_g - t'_m)}{(t''_g - t''_m)}}, \quad (3)$$

де t'_m, t''_m – температура щебеню на вході і виході теплообмінного каналу.

Витрата повітря розраховувався за швидкістю, яка визначалася за допомогою термоанемометра ТТМ-2-02. Марка вентилятора: Домовент ВКО-100.

З метою визначення площі поверхні частинок F_m , що беруть участь в теплообміні, труба діаметром 10 см заповнювалася щебенем на висоту 10 см. Далі розраховувалося кількість частинок і для кожної визначалися розміри найбільшої і найменшої сторін. Для оцінки площі поверхні частинок щебеню в теплообмінному каналі було прийнято припущення, що частка має форму паралелепіпеда. За значенням сторін вираховувалася площа поверхні частинок. В умовах проведеного експерименту визначено, що сумарна площа становила 0,71 м².

Слід було також визначити, яка частина поверхні частинок щебеню, що заповнюють теплообмінний канал, контактує з потоком повітря, тобто бере участь

у теплообміні. З цією метою нижня частина труби, заповненої щебенем, щільно закривалася кришкою. У трубу заливалася фарба, яка через невеликий проміжок часу зливалася при знятті кришки. Після висихання фарби частки витягувалися і оцінювалося, яка частина поверхні не була пофарбована. З'ясувалося, що 9,8% поверхні не брала участі в теплообміні, що враховувалося при проведенні розрахунків.

Результати експериментального дослідження процесу теплообміну в гранульованій насадці

Експерименти проводилися протягом чотирьох діб. На рис. 3 представлені результати вимірювання температур щебеню по довжині каналу і повітря на вході і виході регенератора протягом третьої доби.

Початкова температура щебеню в гранульованій насадці становила 21 °С. Після досягнення температури повітря в теплиці 38 °С, що відповідало 11-й годині, включався вентилятор і починався нагрів шару частинок в насадці. Провал на температурній кривій повітря 1 обумовлений тимчасовою хмарністю. Хід кривих нагрівання щебеню (в періоді нагріву) з незначним запізненням у часі повторює графік зміни температури повітря. Після зменшення інтенсивності сонячного випромінювання температура в теплиці почала знижуватися. Після того, як температура повітря на виході стала перевищувати температуру повітря на вході, вентилятор був вимкнений. Це відповідало 17-й години. Всього період роботи вентилятора склав 6 годин. Незважаючи на те, що теплообмінний канал був

теплоізолюваний, спостерігалися втрати в навколишнє середовище, внаслідок чого температура щебеню знижувалася після виключення вентилятора (інтервал між лініями II та III на рис. 3). Зроблено висновок, що доцільно на вході і виході теплообмінної ділянки встановити теплоізолювані заслінки, які будуть автоматично закриватися при виключенні вентилятора і відкриватися при включенні.

З графіків (рис. 3) видно, що період нагріву закінчився на часі $\tau=166$ хв від початку роботи вентилятора. Далі температура насадки у всіх перетинах знижувалася. У період нагрівання теплота, акумульована гранульованої насадкою, склала $1,87 \cdot 10^5$ Дж. Температура на виході (крива 2) залишається високою для діючої теплиці, що пов'язано зі збільшенням теплопритоків в її внутрішній простір і недостатньою акумулюючою здатністю ґрунтового регенератора. Для збільшення кількості акумульованої теплоти слід збільшити масу насадки і витрату повітря. Температурні криві для щебеню 3, 4, 5 показують, що по довжині теплообмінного каналу температура знижується, що спостерігається внаслідок теплових втрат в ґрунт. Для даного теплообмінного ка-

налу з обраною теплоізоляцією отримано, що втрати теплоти від теплообмінного каналу в ґрунт складають в середньому 10,8 Вт. Рекомендується допускати не більше 5% втрат теплоти, для чого раціонально збільшити товщину ізоляції. Для застосовуваних матеріалів товщина ізоляції повинна скласти 4,3 см.

Як показує хід температурних кривих (рис. 3) після включення вентилятора в нічний час (на графіку рис. 3 позначено лінією III), потік повітря при проходженні гранульованій насадці нагрівався в середньому від 22 °С до 26 °С протягом чотирьох годин. Цей період (охолодження насадки) характеризувався зниженням температури повітря на вході в канал, оскільки температура навколишнього середовища в нічний час падала.

На рис. 4 представлений графік зміни теплового потоку, переданого від повітря часткам гранульованої насадки, що розрахований за формулою (1).

Внаслідок того, що температура повітря в теплиці з 11 години дня до 14г 30 хв підвищувалася від 38 °С до 47 °С, збільшувався тепловий потік від повітря до гранульованої насадки. Температурний напір після 14 год 30 хв між повітрям і насадкою знижується, що викликало зниження кількості переданої теплоти.

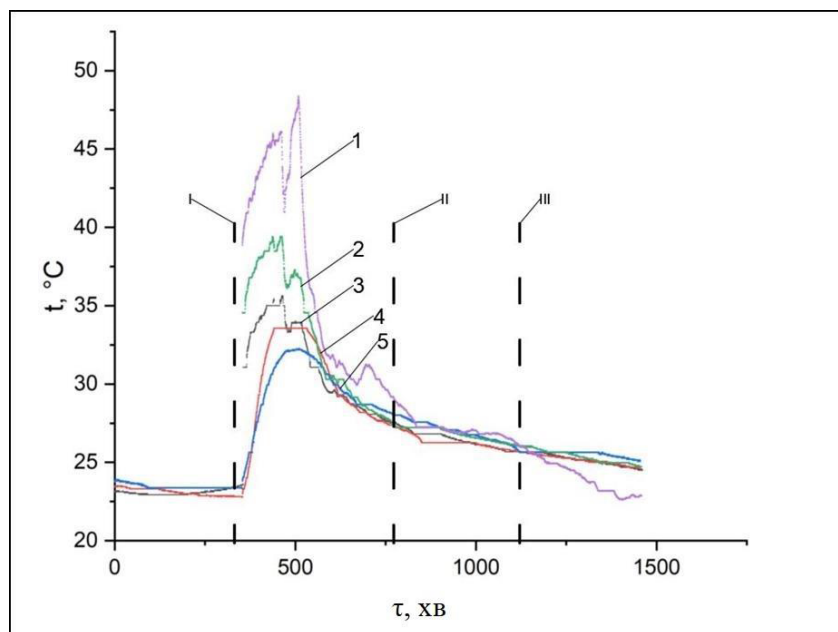


Рис. 3. Зміна температур повітря і гранульованої насадки протягом доби:

1 – температура повітря на вході теплообмінного каналу, 2 – температура повітря на виході з теплообмінного каналу, 3 – температура шару гранульованого матеріалу на вході в теплообмінний канал, 4 – в середині каналу, 5 – на виході теплообмінного каналу

I – включення вентилятора в денний час, II – вимикання вентилятора, III – включення вентилятора в нічний час

На рис. 5 представлений графік зміни коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну в періоді нагріву.

Коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну в період нагріву гранульованої насадки змінювався в межах від $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ до $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. При такому значенні коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну і для гранітного щебеню, що застосовується в дослідженнях, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, значення числа Біо знаходиться в межах $0,05 \dots 0,1$. Таким чином, рекомендація,

згідно якої при виборі матеріалу гранульованої насадки для накопичення теплової енергії число Біо має бути низьким, виконується. Дана вимога обумовлена тим, що при $Bi \rightarrow 0$ (на практиці $Bi < 0,1$) термічний опір теплопровідності не впливає на інтенсивність теплообміну, процес визначається зовнішніми умовами, тобто коефіцієнтом міжкомпонентного теплообміну.

Проведені експерименти доводять доцільність застосування ґрунтового регенератора, здатного акумулюю-

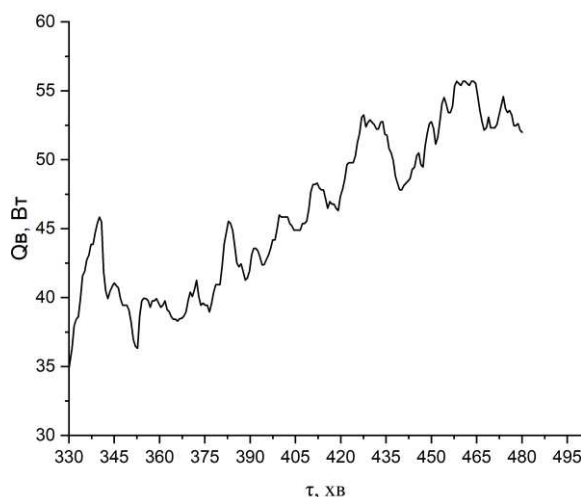


Рис. 4. *Зміна теплового потоку, переданого від повітря часткам гранульованої насадки в періоді нагріву ґрунтового регенератора*

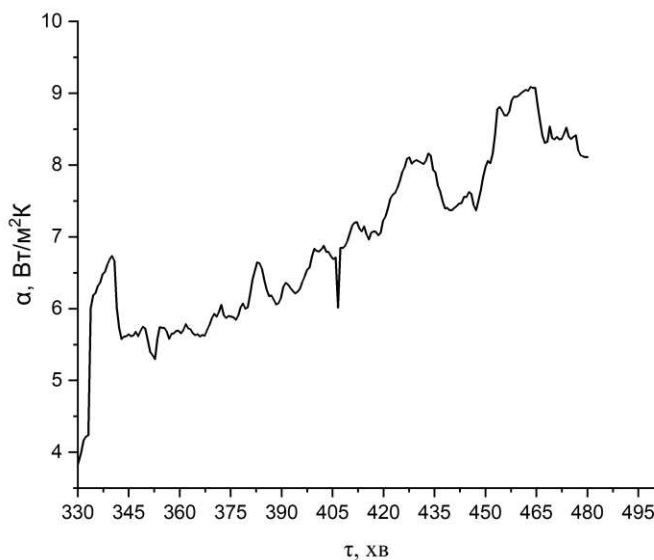


Рис. 5. *Зміна коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну в періоді нагріву ґрунтового регенератора*

вати теплоту повітря в теплиці в денний час і використовувати її для нагріву повітря в нічний час. При цьому для промислового використання слід усунути недоліки, виявлені під час проведення експериментів, і провести доопрацювання регенератора, зокрема, встановити теплоізоляційні автоматизовані заслінки на кінцях теплообмінного ділянки.

Висновки

Вивчені та проаналізовані функціональні особливості роботи ґрунтового тепличного теплообмінника регенеративного типу з нерухомою гранульованою насадкою. На підставі отриманих протягом доби експериментальних залежностей температур компонентів (повітря і тверді частинки) визначено, що період нагріву при обраній масі завантаження (15,5 кг) становив 166 хв.

У період нагрівання теплота, акумульована гранульованої насадкою, склала $1,87 \cdot 10^5$ Дж. Для збільшення кількості акумульованої теплоти слід збільшити масу насадки і витрату повітря.

Максимально можливо підвищити температуру гранульованої насадки і зберегти акумульовану нею теплоту в період, коли вентилятор був вимкнений, неможливо внаслідок істотних втрат теплоти за товщиною ізоляції зі спіненого поліетилену 0,8 см. У промислових зразках слід збільшити товщину ізоляції до 4,3 см з тим, щоб теплові втрати від теплообмінної ділянки в ґрунт не перевищували 5%, і передбачити установку ізолюваних заслінок на її кінцях, що закриваються після завершення періоду нагріву тв. відкриваються в період охолодження.

Коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну в період нагріву змінювався в межах $4 \text{ Вт/м}^2\text{К} \dots 9 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. У цьому випадку число Біо знаходиться в діапазоні $0,05 \dots 0,10$, що дозволяє зробити висновок про раціональність використання щебеню в якості матеріалу для насадки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hazami M., Kooli S., Lazaar M. etc. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning // *American Journal of Environmental Sciences*. – 2005. – V. 1(4). – P. 270-277. DOI:10.3844/ajessp.2005.270.277.
2. Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of solar energy to heat greenhouses // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 985, Iss. 1. – P. 1-10. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012013.
3. Bazgaou A, Fatnassi H, Bouharroud R etc. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse // *Solar Energy*. – 2020. – V. 198. – P. 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>
4. Boshkova I., Volgusheva N., Solodka A. etc. Development of a soil regenerator with a granular nozzle for greenhouses // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – V. 4(8-106). – P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210684>.
5. Горбис З. П., Календерьян В. А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. Москва: Энергия, 1975. – 296 с.
6. Bartzanas T., Tchamitchian M., Kittas C. Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption // *Biosystems Engineering*. – 2005. – V. 91, Iss. 4. – P. 487–499. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2005.04.012.
7. Taki M., Rohani A., Rahmati-Joneidabad M. Solar thermal simulation and applications in greenhouse // *Information processing in Agriculture*. – 2018. – V. 5, Iss. 1. – P. 83-113. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003>.
8. Mesmoudi K., Soudani A., Zitouni B. Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season // *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. – 2010. – V. 9, Iss. 1. – P. 27–37. DOI: 10.1016/j.jaubas.2010.12.007.
9. Pavlov G., Olesen B. Thermal energy storage—A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—Seasonal storage in the ground // *Journal HVAC&R Research*. – 2012. – V. 18, Iss. 3. – P. 515-538. DOI:10.1080/10789669.2012.667039.
10. Almendros-Ibáñez J. A., Fernández-Torrijos M., Sobrinoc C. A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds // *Solar Energy*. – 2019. – V. 192, No. 1. – P. 193-237. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.047>.
11. Adeyanju A., Manohar K. Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2009. – V. 4, №5. – P. 166–177.
12. Albrecht K. J., Ho K. C. Heat transfer models of moving packed-bed particle-to-sCO₂ heat exchangers // *Proceedings of the ASME 2017 Power and Energy Conference Power Energy*. – 2017. – June 25-30, Charlotte, North Carolina, USA Power Energy. – P. 331-340. <https://doi.org/10.1115/1.4041546>.

TEST OF A PILOT INSTALLATION OF A SOIL REGENERATOR FOR GREENHOUSES

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Mukminov I.I., Altman E.I.

Odessa National Academy of Food Technologies,
Odessa - 65012, Kanatna 112

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.11>

The relevance of the development of ground regenerative heat exchangers is determined by the need to save energy resources for heating greenhouses at night and maintaining the required temperature level during the day. The aim of the work is to study working capacity of a ground regenerator for a greenhouse when testing a pilot plant in full-scale conditions. To achieve this goal the following main tasks were solved: experimental research of soil regenerator pilot plant operation was carried out, the heating period of nozzle and cooling period were determined by the obtained temperature curves, the coefficient of intercomponent heat exchange during the heating period was estimated, the rationality of material choice for granulated nozzle was proved, recommendations on improvement of soil regenerator design for industrial use were developed. The research was conducted on a pilot installation of a soil regenerator, which consists of a heat-exchange duct filled with granulated material and covered with a layer of insulation, and ducts with an exhaust duct fan installed at the outlet. Data on air and nozzle temperatures, which were taken during the day, were used to conduct thermal calculations and assess the efficiency of the ground regenerator. It was determined that the heating period at the selected loading mass of 15.5 kg is not long relative to the duration of the experiment and was 166 min. To increase the amount of accumulated heat it is recommended to increase the weight of the nozzle and air flow rate. It was determined that the coefficient of inter-component heat transfer during the heating period varied between 4 W/m²K and 9 W/m²K. In this case, the Bio number is in the range of 0.05 - 0.10, which allows us to conclude that the use of crushed stone as a nozzle material is rational. It is recommended to increase the thickness of insulation to 4.3 cm so that the heat loss from the heat exchange section does not exceed 5%, and to provide the installation of insulated plugs at the ends of the heat exchange section, closing after the end of the heating period.

References 12, figures 5.

Key words: granular nozzle, airflow, temperature curves, insulation, intercomponent heat transfer coefficient, heat flow.

1. Hazami M., Kooli S., Lazaar M. etc. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning // American Journal of Environmental Sciences, 2005, V. 1(4), P. 270-277.
2. Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of solar energy to heat greenhouses // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, V. 985, Iss. 1, P. 1-10.
3. Bazgaou A, Fatnassi H, Bouharroud R etc. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse // Solar Energy, 2020, V. 198, P. 8-24.
4. Boshkova I., Volgusheva N., Solodka A. etc. Development of a soil regenerator with a granular nozzle for greenhouses // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, V. 4(8-106), P. 14-20.
5. Gorbis Z. R., Kalender'yan V. A. Heat exchangers with flowing dispersed heat carriers, Moscow, Energy, 1975. – 296 p. (in Rus.)
6. Bartzanas T., Tchamitchian M., Kittas C. Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption // Biosystems Engineering, 2005, V. 91, Iss. 4, P. 487-499.
7. Taki M., Rohani A., Rahmati-Joneidabad M. Solar thermal simulation and applications in greenhouse // Information processing in Agriculture, 2018, V. 5, Iss. 1, P. 83-113.
8. Mesmoudi K., Soudani A., Zitouni B. Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season // Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences, 2010, V. 9, Iss. 1, P. 27-37.
9. Pavlov G., Olesen B. Thermal energy storage—A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—Seasonal storage in the ground // Journal HVAC&R Research, 2012, V. 18, Iss. 3, P. 515-538.
10. Almendros-Ibáñez J. A., Fernández-Torrijos M., Sobrinoc C. A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds // Solar Energy, 2019, V. 192, No. 1, P. 193-237.
11. Adeyanju A., Manohar K. Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds // Research Journal of Applied Sciences, 2009, V. 4, №5, P. 166-177.
12. Albrecht K. J., Ho K. C. Heat transfer models of moving packed-bed particle-to-sCO₂ heat exchangers // Proceedings of the ASME 2017 Power and Energy Conference Power Energy, 2017, June 25-30, Charlotte, North Carolina, USA Power Energy, P. 331-340.

Отримано 12.08.2021

Received 12.08.2021