

УДК 621.763

ВИКОРИСТАННЯ ГНУЧКИХ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ТЕПЛОВИХ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ

Приймак О.В.¹, докт. техн. наук, **Басок Б.І.²**, чл.-кор. НАН України, **Пасічник П.О.³**, канд.тех.наук, **Гончарук С.М.⁴**, канд. техн. наук

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, 03037, Україна, 02opriymak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3081-6057>

² Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, borys.basok@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8935-4248>

³ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, pasichnik.pavlo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8499-6949>

⁴ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, goncharuk-s@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5609-7337>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.9>

В статті приведено експериментальне дослідження електротехнічних характеристик вуглеграфітового трикошного полотна, що використане у якості поглинаючого елемента в сонячному тепловому повітряному колекторі. Поглинаюча здатність матеріалу та коефіцієнт тепловіддачі до омиваючого повітря встановлені в попередніх роботах і виявилися не гіршими за металеві аналоги. В дослідженні розглянуто можливість догріву поглинаючого елемента шляхом пропускання електричного струму.

The article presents an experimental study of the electrotechnical characteristics of carbon-graphite knitted fabric used as an absorbing element in a solar thermal air collector. The absorbing capacity of the material and the coefficient of heat transfer to the washing air were established in previous works and turned out to be no worse than metal analogues. The study considered the possibility of reheating the absorbing element by passing an electric current.

Бібл. 10, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: геліосистеми теплопостачання, вуглеграфітове полотно, електричний нагрів, альтернативні джерела енергії.

Вступ. Електричний нагрів є найбільш зручним способом доведення теплоносія в системах теплопостачання до необхідної заданої температури з точки зору регулювання та конструктивного облаштування нагрівачів. Особливо, це стосується комбінації нагріву з нестабільними джерелами енергії, такими як сонячне випромінювання. Згладжування нерівномірності надходження сонячної радіації в геліосистемах теплопостачання є важливою проблемою експлуатаційної надійності таких систем [1]. Класична система геліосистеми теплопостачання (рис.1) складається з приймача сонячної енергії 1 (колектор), нагнітача 2, каналів з теплоносієм 3, акумулятора теплоти 4, додаткового джерела теплоти 5 та запірнорегулюючої арматури 6. Розвиток теплової геліотехніки ґрунтується на двох основних принципах: збільшення ефективності приймачів сонячного випромінювання та вирішення проблем акумулювання отриманої теплової енергії. Найбільший на-

уковий інтерес щодо дослідження приймачів сонячного випромінювання викликає його поглинаючий елемент. Основними вимогами для нього є висока поглинаюча здатність (коефіцієнт поглинання випромінювання $\alpha \geq 0,9$) та високий коефіцієнт тепловіддачі до теплоносія (значення залежить від типу теплоносія) [2]. Для інженерних розрахунків теплових колекторів сонячної енергії визначальною технічною характеристикою являється температура поглинаючого елемента, тому контролюючи його температуру, можна регулювати і контролювати відпуск теплової енергії. Нестачу сонячної активності в геліосистемах компенсує додаткове джерело теплоти. В [3] приведено тип повітряного геліоколектора, де в якості поглинаючого елемента використовується безпосередньо електронагрівач, тобто поєднується два елементи геліосистеми – тим самим універсалізуючи нагрівач.

Основною науковою задачею при розробці таких приладів є вибір матеріалу для поглинаючого елемента, який одночасно задовольнив би вимоги щодо поглинаючої здатності, тепловіддачі та електротехнічних характеристик провідника. Таким матеріалом вибрано вуглеграфітове трикотажне полотно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Повітряний тепловий геліоколектор – це пристрій, що перетворює сонячне випромінювання на теплову енергію та передає його теплоносію-повітря. Конструктивно всі геліоколектори мають подібну будову (рис. 2) і складаються з щільного теплоізолюваного корпусу (1), світлопрозорого покриття (2), поглинаючого елемента (3), та входних і вихідних отворів. Сонячне випромінювання проходячи через світлопрозоре покриття поглинається поглинаючим елементом, який в свою чергу нагрівається. Нагріваний поглинаючий елемент омивається повітрям, внаслідок чого воно нагрівається. Коефіцієнт корисної дії визначається з відомого рівняння Хотела-Уїллера-Блісса[1]:

$$\eta_K = F' \cdot \left[(\tau\alpha)_{\Sigma} - U_L \cdot \frac{T_{\text{пов.}} - T_{\text{н.с.}}}{t_c} \right], \quad (1)$$

де: F' – коефіцієнт ефективності поглинаючого елемента; $(\tau\alpha)_{\Sigma}$ – оптичний ККД сонячного повітропідігрівача; U_L – загальний коефіцієнт теплових втрат; $T_{\text{пов.}}$ – середня температура повітря в нагрівачі; t_c – інтенсивність сонячного випромінювання. Коефіцієнт ефективності поглинаючого елемента характеризується його поглинаючою здатністю α (величина, що показує відношення поглинутого поверхнею випромінювання до загального, що падає на опромінену площу) та теплофізичними властивостями матеріалу поглинаючого елемента. В свою

чергу зміна температури теплоносія в геліоколекторі характеризується коефіцієнтом тепловіддачі від поглинаючого елемента до омиваючого його теплоносія.

Теплові повітряні геліоколектори, які виробляються в світі, мають ряд спільних істотних недоліків. По-перше, це їх висока вартість, що веде до збільшення капітальних витрат на облаштування та низьку рентабельність систем повітряного теплопостачання. По-друге, велика вага колекторів обмежує їх використання в існуючих будівлях, призводить до необхідності посилення проектаних несучих конструкцій або планування додаткових опорних споруд, що знову ж таки неминуче призведе до збільшення капітальних витрат. Такі проблеми формують набір відповідних вимог для повітряних геліоколекторів, при виконанні яких стане можливим створити дієву, ефективну і рентабельну систему теплопостачання.

Що стосується поглинаючого елемента ринкових моделей повітряних геліоколекторів, то зазвичай він виконаний з профільованого металевого (сталь, мідь, алюміній) листа, що вкритий селективним покриттям. В представлений в [3] моделі використане вуглеграфітове трикотажне полотно, яке за теплофізичними властивостями не поступається класичним матеріалам. В свою чергу за коефіцієнтом тепловіддачі та поглинаючою здатністю вуглеграфітове трикотажне полотно є ефективнішим за металеві аналоги, за рахунок фізичних властивостей вуглецю (див. табл. 1), розвиненої пористо-капілярної структури та вібрацій ворсу.

Нагрівачі елементи на основі вуглецевих волокон з'явилися в другій половині XX сторіччя. Вони були майже одночасно отримані в США і СРСР, а згодом і у Великобританії та Японії. Вуглецеві волокна належать до класу вуглеграфітових матеріалів і по характеру валентних зв'язків між атомами вуглецю відносяться до перехідних форм карбону як органічних

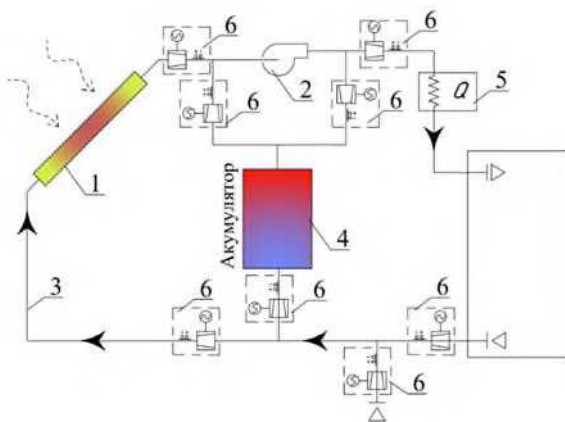


Рис. 1. Принципова схема повітряної геліосистеми теплопостачання

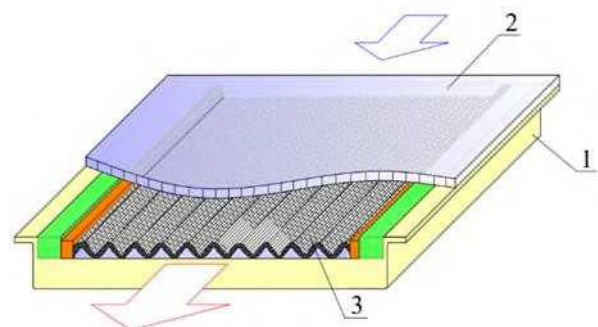


Рис. 2. Загальний вигляд повітряного теплового геліоколектора

Табл. 1. Характеристики матеріалів поглинаючих елементів, що використовуються у геліотехніці

Назва характеристики	Алюміній	Мідь	Сталь	Вуглеграфітове полотно УТП
Теплопровідність Вт/(м•К)	211	385	47,6	287
Теплоємність кДж/(кг•К)	0,93	0,385	0,46	0,72
Густина, кг/м ³	2675	8795	7850	2200
Температуропровідність, м ² /с	0,085	0,114	0,008	0,181
Електричний опір, Ом•м •10 ⁴	0,0271	0,0175	0,14	0,4
Необхідність сективного покриття	Так	Так	Так	Ні

напівпровідників. Найбільш рівномірним по характеристикам вуглеволокнистим матеріалом є вуглеволокнистий папір. Виготовляються композиції із застосуванням графітового порошка та технічного вуглецю у суміші з непровідною целюлозою. На теренах СРСР розроблений вуглеволокнистий папір на основі штапельного вуглеволокна типу «углен» і «грален» [4].

Нагрівальні елементи з графітизованих тканин використовуються як для отримання температур до 2427 °С, так і для низькотемпературних процесів. В залежності від використовуваного ізоляційного матеріалу отримують жорсткі і гнучкі нагрівальні елементи.

Найбільш придатним з точки зору теплообмінних процесів для використання у повітряних геліоколекторах є об'ємне вуглеграфітове трикотажне полотно з гофрованою укладкою [5]. Головним прототипом вуглеграфітових трикотажних полотен є полотно марки Урал (ГОСТ 28005-88), що випускається вітчизняними фабриками напрямку «хімволокно» [6]. Використання вуглеграфітових волокон, карбонізованих і графітизованих тканин та вуглецевого паперу у якості електронагрівачів відоме, що зумовлено достатнім питомим електричним опором вуглецевих волокон, термо- та

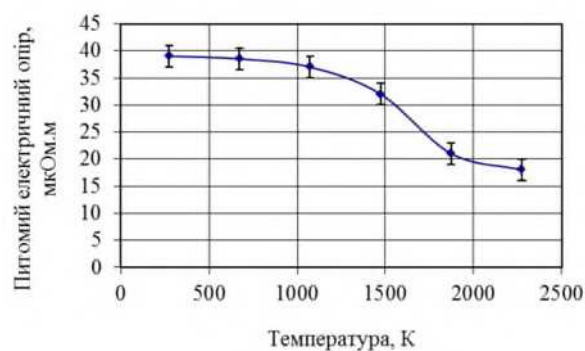


Рис. 3. Залежність зміни питомого електричного опору від температури вуглеграфітових провідників

електростійкістю. Так, на основі графітованої вуглецевої тканини Урал Т-22 і резолюної фенолоформальдегідної смоли марки ЛБС-20 виготовляється ряд вуглецевих композиційних матеріалів, на основі яких, зокрема, проводиться розробка та модернізація електровакуумних печей для галузі машинобудування [7].

Використання вуглеграфітових трикотажних полотен супроводжується проблемою зменшення питомого електричного опору при збільшенні температури матеріалу. На рис. 3 зображено залежність зміни питомого електричного опору від температури [7]. Зазвичай, робоча температура сонячних теплових колекторів становить $\leq 200^{\circ}\text{C}$ [1], що дає змогу стверджувати, що фактом зміни питомого електричного опору в залежності від температури матеріалу в рамках теплової геліотехніки можна нехтувати.

В зазначеному у [3] повітряному геліоколекторі використано вуглеграфітове трикотажне полотно УТП-1, розроблене в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Фізико-хімічні властивості матеріалу надані виробником та перевірені в акредитованій випробувальній лабораторії ПрАТ «Волтекс-Меланж» в м. Луцьк. Матеріал є легкий, стійкий до ультрафіолетового випромінювання, еластичний та має нижчу вартість ніж звичні метали, що використовуються у геліотехнічному обладнанні. У звіті щодо досліджень приведено значення поверхневого питомого електричного опору $0,4 \cdot 10^4$ Ом. Визначити придатне для інженерних розрахунків значення питомого опору провідника, використавши дану величину, не виявляється можливим. Це зумовлено анізотропністю вуглеграфітових волокон [8,9]. Дослідження питомого електричного опору ВТП потребує експериментальних досліджень.

Формулювання цілі. Метою роботи є експериментальне дослідження електротехнічних характеристик вуглеграфітового трикотажного полотна.

1. Опис методики проведення дослідження.

Теплова потужність електричного нагріву провідника визначається за законом Джоуля-Ленца. Тому при відповідному електричному опорі можна обходитися відносно малими та безпечними силами струмами. Нагрів електронагрівача при постійному значенні напруги U визначається лише величиною електричного опору провідника. Фізичною передумовою адекватного визначення питомого електричного опору однорідного напівпровідникового матеріалу за його повним електричним опором R є те, що в слабких електричних полях, коли вольтамперна характеристика $I = I(U)$ досліджуваного зразка з такого матеріалу у формі прямокутного паралелепіпеда, циліндра або стержня з круглим чи прямокутним перетином підпорядковується закону Ома, зв'язок напруги U і сили струму I між омичними контактами зразка згідно з [1] описується формулою

$$\frac{U}{l} = R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2)$$

де R – електричний опір провідник; ρ – питомий електричний опір провідника; l – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу провідника.

Піддається сумніву коректне визначення поперечного перерізу провідника, який формується з вуглеграфітового трикотажного полотна. Тому визначальною величиною для конкретного типу текстильного матеріалу являється ρ/S , Ом/м, яку для подальших розрахунків необхідно визначати експериментально.

На рис. 2 приведено загальний експериментальний стенд повітряного геліоколектора з поглинаючим елементом з вуглеграфітового трикотажного полотна. Електричний нагрів поглинаючого елемента з ВТП забезпечується двома мідними провідниками, що під'єднано на протилежних краях тканини таким чином щоб забезпечити відповідну омичність контактів, підключених до джерела постійного струму сформованого з випрямляча, трансформатора та вимірювальної ділянки (вольтметр, амперметр), що живиться від мережі 220В. Прилад оснащений ручним регулятором потужності. Величина питомого електричного опору визначається через визначення повного опору, на основі експериментально вимірюваних значень напруги і струму на лінійній ділянці вольтамперної характеристики зразків. Тому для правомірності і адекватності виразу для опору використання формули (2) та з метою визначення питомого опору напівпровідникового матеріалу необхідно дослідити вольтамперну характеристику зразка з вуглеграфітового трикотажного полотна [10].

В даному випадку побудова якісної вольт-амперної характеристики напівпровідникової структури вуглеграфітового трикотажного полотна проводиться у статичному режимі. Вимірювання сили струму і напруги проводилися для трьох довжин l провідника (відстань між мідними пластинами) 0,3 м; 0,5 м; 1 м, для різних напруг. Результати експериментальних досліджень приведені в табл. 2. Середньоінтегральне значення питомого електричного опору ρ/S складає 15,07 Ом/м. Така величина відповідає вимогам щодо електронагрівачів, що дає змогу стверджувати про використання зазначе-

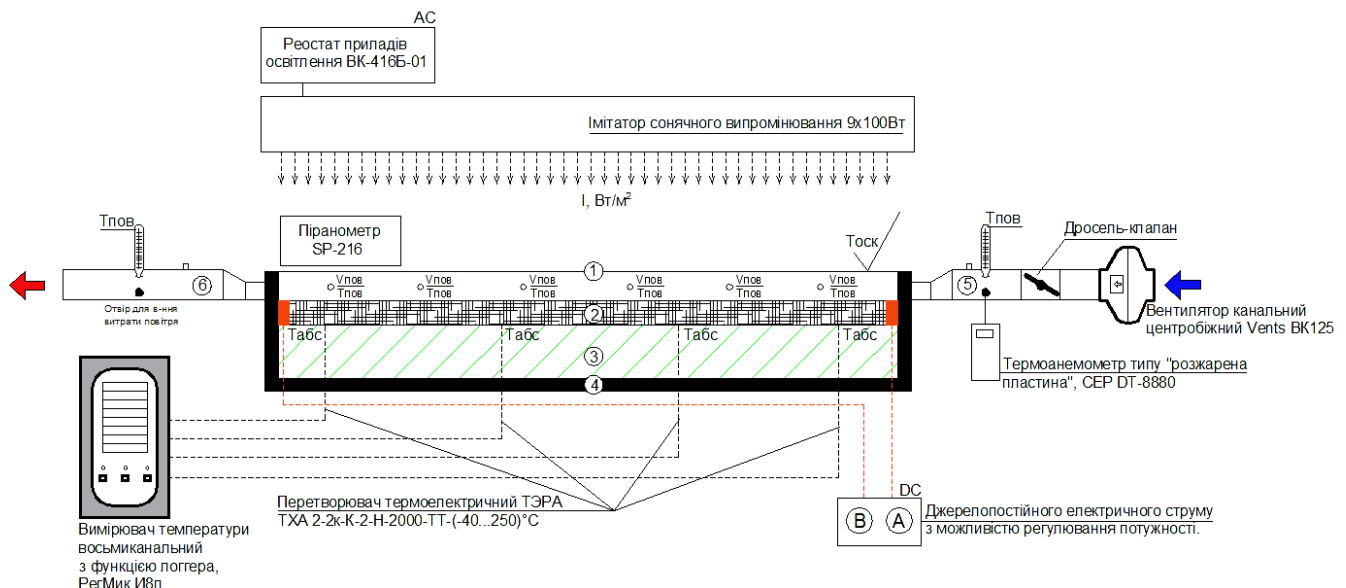


Рис. 4. Принципова схема експериментального стенда

ного вуглеграфітового трикотажного полотна у якості поглинаючого елемента повітряних геліоколекторів з можливістю його електричного нагріву. Інститут матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича має потужності для виготовлення такого матеріалу, що дає змогу планувати серійне виготовлення подібних виробів.

Висновки. Визначальною електричною характеристикою абсорбера із вуглеграфітового трикотажного полотна є величина ρ/S , Ом/м, яку необхідно визначати експериментально.

Експериментально визначено питомий електричний опір вуглеграфітового трикотажного полотна типу УТП виражений величиною ρ/S складає 15,07 Ом/м.

Дані дослідження дають змогу визначати електричну теплову потужність приладу в незалежності від розміру приладу. Результати досліджень приведених в статті можуть бути використані лише для конкретного типу вуглеграфітового трикотажного полотна. Для інших типів полотен необхідно проводити подібні дослідження при недостатності подібної інформації.

Табл. 2. Результати експериментальних досліджень

l	u	i	R	ρ/S	$\bar{\rho}$
м	В	А	Ом	Ом/м	Ом/м
0,5	45	6	7,50	15,00	15,07
	100	13	7,69	15,38	
	125	17	7,35	14,71	
0,3	40	10	4,00	13,33	
	75	15	5,00	16,67	
	90	19	4,74	15,79	
1	35	2,5	14,00	14,00	
	60	4	15,00	15,00	
	110	7	15,71	15,71	

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Xudong Zhao*. Advanced Energy Efficiency Technologies for Solar Heating, Cooling and Power Generation / Xudong Zhao, Xiaoli Ma // Springer Nature Switzerland AG 2019, – P.539.
2. *John A. Duffie*. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th Edition / John A. Duffie, William A. Beckman// — ISBN: 978-0-470-87366-3, New Jersey, Wiley 2013, - P. 944.
3. *Пасічник П.О.* Сонячно-електричний повітряний тепловий колектор// Патент України на корисну модель №97541 від 25.03.2015 р., Бюл. №6..
4. *Горелов В.П.* Низкотемпературные нагреватели из композиционных материалов в промышленности и быту; 2-е изд., стер./ В.П. Горелов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 208с.
5. *Приймак О.В.* Дослідження тепловіддачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна / О.В. Приймак, П.О. Пасічник // «Вісник КНУТД» серія «Технічні науки» №1(94), 2016, с.85-92.
6. *ОАО «СветлогорскХимволокно»* [електронний ресурс].
URL: <http://www.sohim.by>
7. *G.W. Meetham*. Materials for High Temperature Engineering Applications / G.W. Meetham , M.H. Van de Voorde // ISBN-10: 3642569390, Springer 2011, – P.176.
8. *A.K. Haghi*, Heat and Mass Transfer in Textiles. Second edition / A.K. Haghi // ISBN: 978-1-61804-025-1. – Montreal: WSEAS Press, 2011. – P.132.
9. *Sang Il Park*/ Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame/ Sang Il Park, Doo Hyun Baik// Textile Research Journal, Volume 67, Issue 5, May 1997, p.311-316.
10. *B. Sapoval*. Physics of Semiconductors/ B. Sapoval, C. Hermann// ISBN-10:0387940243, Springer; 1995th edition, – P.330.

USE OF FLEXIBLE ELECTRIC HEATERS FOR AIR SOLAR HEATERS

O.V. Priymak¹, B.I. Basok², P.O. Pasichnyk^{2,2}, S.M. Goncharuk²¹ - Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Povitroflotskyi 31, 03037, Ukraine² - Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Marii Kapnist (Zhelyabov) 2a, 03057, Ukraine<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.9>

Solar energy is an important component of the energy potential of renewable energy sources in Ukraine, on the basis of which the consumption of fossil fuels is reduced and the energy independence of the country is increased. Solar heat supply systems have greater energy efficiency than electric ones, so their development is an important urgent task. The central element of any solar system is a collector of solar energy that absorbs radiation and transmits it to a coolant or direct heating object. One of the ways of development of solar thermal heaters is the use of new materials for the manufacture of solar radiation absorbers, which significantly expands the possibility of using nozzle and porous capillary materials, in contrast to liquid solar collectors. It is advisable to use textile materials for the manufacture of absorbers, which allows to reduce the cost of solar energy collectors, as well as to significantly improve their installation and operational characteristics. In particular, the use of carbon graphite knitted fabric makes it possible to apply direct heating of the solar energy absorber with electric current based on certain electrical engineering solutions. At the same time, you can take advantage of the scientific developments in the production of various flexible heaters (electric heaters, medical blankets, etc.). In this way, it will be possible to combine two mandatory elements of solar heat supply systems, a solar energy collector and an additional heat source. The article presents the defining electrotechnical characteristic for a product of this type, namely the specific electrical resistance of the fabric. The paper presents the schematic diagram of the experimental stand and describes the methodology of conducting experimental research. Also given are the results of an experimental study of the specific electrical resistance of carbon graphite knitted fabric VTP-1, produced in non-experimental production at the Institute of Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine named after I.M. Frantsevich, which is used as an absorbing element in an air thermal solar collector.

References 10, tables 2, figures 4.

Keywords: solar heating systems, carbon graphite cloth, electric heating, alternative energy sources.

1. Xudong Zhao. Advanced Energy Efficiency Technologies for Solar Heating, Cooling and Power Generation / Xudong Zhao, Xiaoli Ma // Springer Nature Switzerland AG 2019, – P.539.

2. John A. Duffie. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th Edition / John A. Duffie, William A. Beckman// — ISBN: 978-0-470-87366-3, New Jersey, Wiley 2013, - P. 944.

3. Pasichnyk P.O. “Soniachno-electrichnui povitriani teplovui kolektor .” Patent of Ukraine 97541. 25 March 2015.

4. Gorelov V.P. Nizkotemperaturnye nagrevateli iz kompozitsionnykh materialov v promyshlennosti i bytu. Direkt Media, Berlin-Moscow, 2016. 208 p.

5. Pryimak O. V., Pasichnyk P. O. “Doslidzhennia teploviddachi absorbera soniachnoho povitropidhrivacha, vyhotovlenoho z hofrovanoho vuhlehrafitovoho polotna”. Visnik KNUITD, seriia “Tehnichni nauky”. 2016. №1(94). P. 85-92.

6. OAO «SvetlogorskKhimvolokno». URL: <http://www.sohim.by>

7. G.W. Meetham. Materials for High Temperature Engineering Applications / G.W. Meetham , M.H. Van de Voorde // ISBN-10: 3642569390, Springer 2011, – P.176.

8. A.K. Haghi, Heat and Mass Transfer in Textiles. Second edition / A.K. Haghi // ISBN: 978-1-61804-025-1. – Montreal: WSEAS Press, 2011. – P.132.

9. Sang Il Park/ Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame/ Sang Il Park, Doo Hyun Baik// Textile Research Journal, Volume 67, Issue 5, May 1997, p.311-316.

10. B. Sapoval. Physics of Semiconductors/ B. Sapoval, C. Hermann// ISBN-10:0387940243, Springer; 1995th edition, – P.330.

Отримано 08.09.2022

Received 08.09.2022