



# Funksional nanokompozit keramik plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichining issiqlik samaradorligini oshirish

Alisher X. Alinazarov<sup>1</sup>, Dilshodbek M. Jo'raxanov<sup>1,a</sup>

<sup>1)</sup> t.f.n., prof., Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, 160115, O'zbekiston; [alinazarovalisher@gmail.com](mailto:alinazarovalisher@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-5117-4252>

<sup>1,a)</sup> tayanch doktorant., Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, 160115, O'zbekiston; [juraxanovdilshodbek@gmail.com](mailto:juraxanovdilshodbek@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0004-1319-2942>

**Dolzarbli:** quyosh havo qizdirgichlari past potentsialli issiqlik tizimlarida keng qo'llanilib, ularning sanoat, qishloq xo'jaligi va qurilish sohasidagi amaliy ahamiyati ortib bormoqda. Biroq mazkur qurilmalarning amaliy issiqlik samaradorligi absorber yuzasida yuzaga keladigan radiatsion va konvektiv issiqlik yo'qotishlari bilan sezilarli darajada cheklanadi. Adabiyotlarda samaradorlikni oshirish maqsadida oqim kanalida turbulizatorlar o'rnatish, sun'iy notekisliklar hosil qilish hamda oqim yo'nalishini murakkablashtirishga asoslangan turli konstruktiv yechimlar taklif etilgan. Ammo ushbu yondashuvlar ko'pincha bosim yo'qotishlarining ortishiga va tizim konstruktiv murakkabligining oshishiga olib keladi. Shu sababli, qurilmaning geometrik tuzilmasini o'zgartirmagan holda absorber sirtining fizik xossalari modifikatsiya qilish orqali issiqlik samaradorligini oshirish masalasi dolzarb ilmiy-amaliy muammo sifatida qaraladi.

**Maqsad:** mazkur tadqiqotning maqsadi metall absorber yuzasi yupqa keramik kompozit plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichining issiqlik samaradorligini energiya balansi modeli asosida tahlil qilish hamda uni oddiy konstruksiyadagi quyosh havo qizdirgichi bilan bir xil ish sharoitlarida solishtirishdan iborat.

**Usullar:** tadqiqot jarayonida quyosh havo qizdirgichining issiqlik jarayonlari energiya saqlanish qonuniga asoslangan energiya balansi modeli yordamida tahlil qilindi. Keramik kompozit plyonka selektiv sirt sifatida qaralib, uning quyosh nurlanishini yutish koeffitsienti ( $\alpha$ ) va nurlanish koeffitsienti ( $\epsilon$ ) ga ta'siri hisobga olindi. Oddiy va keramik plyonka bilan qoplangan absorberlar uchun chiqish havosi harorati hamda termik samaradorlik ko'rsatkichlari bir xil ish sharoitlarida aniqlanib, o'zaro solishtirildi.

**Natijalar:** hisoblash natijalari keramik kompozit plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichining termik samaradorligi oddiy konstruksiyaga nisbatan 17–19 % oraliqda oshishini ko'rsatdi. Ushbu oshish absorber sirtida quyosh nurlanishini yutish koeffitsientining ortishi va nurlanish koeffitsientining kamayishi bilan izohlanadi. Taklif etilgan yondashuv oqim kanalining geometriyasini o'zgartirmagan holda va qo'shimcha bosim yo'qotishlarsiz qurilmaning issiqlik samaradorligini oshirish imkonini berishi bilan amaliy jihatdan muhim ustunlikka ega ekanligi aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** quyosh havo qizdirgichi; keramik kompozit plyonka; absorber; issiqlik samaradorligi; selektiv sirt; energiya balansi; nurlanish; konveksiya.

## Повышение тепловой эффективности солнечного воздушного нагревателя, покрытого функциональной нанокomпозитной керамической плёнкой

Алишер Х. Алиазаров<sup>1</sup>, Дилшодбек М. Жураханов<sup>1,a</sup>

<sup>1)</sup> к.т.н., проф., Наманганский государственный технический университет, Наманган, 160115, Узбекистан; [alinazarovalisher@gmail.com](mailto:alinazarovalisher@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-5117-4252>

<sup>1,a)</sup> докторант (PhD), Наманганский государственный технический университет, Наманган, 160115, Узбекистан; [juraxanovdilshodbek@gmail.com](mailto:juraxanovdilshodbek@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0004-1319-2942>

**Актуальность:** солнечные воздушные нагреватели широко применяются в низкопотенциальных тепловых системах, и их практическая значимость в промышленности, сельском хозяйстве и строительстве постоянно возрастает. Однако практическая тепловая эффективность данных устройств в значительной степени ограничивается радиационными и конвективными тепловыми потерями, возникающими на поверхности абсорбера. В научной литературе с целью повышения эффективности предложены различные конструктивные решения, основанные на установке турбулизаторов в канале потока, создании искусственных неровностей и усложнении направления движения воздуха. Вместе с тем такие подходы зачастую приводят к увеличению потерь давления и росту конструктивной сложности системы. Поэтому повышение тепловой эффективности солнечных воздушных нагревателей без изменения их геометрической конструкции за счёт модификации физических свойств поверхности абсорбера рассматривается как актуальная научно-практическая задача.

**Цель:** анализ тепловой эффективности солнечного воздушного нагревателя с металлическим абсорбером, покрытым тонкой керамической композитной плёнкой, на основе модели энергетического баланса, а также его сравнение с солнечным воздушным нагревателем простой конструкции при одинаковых условиях эксплуатации.

**Методы:** в ходе исследования тепловые процессы солнечного воздушного нагревателя анализировались с использованием модели энергетического баланса, основанной на законе сохранения энергии. Керамиче-

**For citation:** Alinazarov A.X., Juraxanov D.M. Increasing the thermal efficiency of a solar air heater coated with a functional nanocomposite ceramic film. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 104-111.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19999129>

129

Received: 25.10.2025

Revised: 18.11.2025

Accepted: 11.02.2026

Published: 26.03.2026

**Copyright:** © Alisher X. Alinazarov, Dilshodbek M. Juraxanov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ская композитная плёнка рассматривалась в качестве селективной поверхности, при этом учитывалось её влияние на коэффициент поглощения солнечного излучения ( $\alpha$ ) и коэффициент излучения ( $\epsilon$ ). Для обычного абсорбера и абсорбера с керамическим покрытием при одинаковых условиях работы были определены и сопоставлены температура выходящего воздуха и показатели тепловой эффективности.

**Результаты:** результаты расчётов показали, что тепловая эффективность солнечного воздушного нагревателя с керамической композитной плёнкой увеличивается на 17–19 % по сравнению с нагревателем простой конструкции. Установлено, что данное увеличение обусловлено ростом коэффициента поглощения солнечного излучения и снижением коэффициента излучения поверхности абсорбера. Показано, что предложенный подход позволяет повысить тепловую эффективность устройства без изменения геометрии канала потока и без дополнительных потерь давления, что является важным практическим преимуществом.

**Ключевые слова:** солнечный воздушный нагреватель; керамическая композитная плёнка; абсорбер; тепловая эффективность; селективная поверхность; энергия.

## Increasing the thermal efficiency of a solar air heater coated with a functional nanocomposite ceramic film

Alisher X. Alinazarov<sup>1</sup>, Dilshodbek M. Juraxanov<sup>1a)</sup>

<sup>1)</sup> Candidate of Technical Sciences, Professor, Namangan State Technical University, Namangan, 160115, Uzbekistan; [alinazarovalisher@gmail.com](mailto:alinazarovalisher@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-5117-4252>

<sup>1a)</sup> PhD student, Namangan State Technical University, Namangan, 160115, Uzbekistan; [juraxanovdilshodbek@gmail.com](mailto:juraxanovdilshodbek@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0004-1319-2942>

**Relevance:** solar air heaters are widely used in low-potential thermal systems, and their practical importance in industry, agriculture, and construction is steadily increasing. However, the practical thermal efficiency of these devices is significantly limited by radiative and convective heat losses occurring at the absorber surface. In the literature, various design solutions aimed at improving efficiency have been proposed, including the installation of turbulators in the flow channel, the creation of artificial roughness, and the complication of airflow direction. Nevertheless, such approaches often lead to increased pressure losses and higher structural complexity of the system. Therefore, improving the thermal efficiency of solar air heaters without modifying their geometric structure by means of modifying the physical properties of the absorber surface is considered an актуальная scientific and practical problem.

**Aim:** the objective of this study is to analyze the thermal efficiency of a solar air heater with a metal absorber coated with a thin ceramic composite film based on an energy balance model and to compare its performance with that of a solar air heater of simple design under identical operating conditions.

**Methods:** In this study, the thermal processes of the solar air heater were analyzed using an energy balance model based on the law of conservation of energy. The ceramic composite film was considered as a selective surface, and its influence on the solar radiation absorptivity coefficient ( $\alpha$ ) and the emissivity coefficient ( $\epsilon$ ) was taken into account. The outlet air temperature and thermal efficiency indicators for the conventional absorber and the ceramic-coated absorber were determined and compared under identical operating conditions.

**Results:** the calculation results showed that the thermal efficiency of the solar air heater coated with a ceramic composite film increases by 17–19% compared to a solar air heater of simple design. This increase is explained by the enhancement of the solar radiation absorptivity coefficient and the reduction of the emissivity coefficient of the absorber surface. It was established that the proposed approach allows an increase in the thermal efficiency of the device without changing the geometry of the flow channel and without additional pressure losses, which represents a significant practical advantage.

**Keywords:** solar air heater; ceramic composite film; absorber; thermal efficiency; selective surface; energy.

### 1. Kirish (Introduction)

Ma'lumki quyosh energiyasi qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan biri bo'lib, past haroratli issiqlik ishlab chiqarish tizimlarida samarali qo'llanilish imkoniyatiga ega. Quyosh havo qizdirgichlari sanoat, qishloq xo'jalik va qurilish sohalarida havo quritish, issiqlik ta'minoti va texnologik jarayonlarda foydalaniladi [1,2].

Bunday qurilmalar konstruktiv jihatdan soddaligi, arzonligi va suyuqlikli kollektorlarga nisbatan oson ekspluatatsiyasi bilan ajralib turadi [1].

So'nggi yillarda energiya samaradorligini oshirish va an'anaviy yoqilg'ilarga qaramlikni qisqartirish masalalarining dolzarbligi ortib borayotgani, quyosh havo qizdirgichlariga ilmiy va amaliy qiziqishni kuchaytirdi [2].

Quyosh havo qizdirgichlarining amaliy issiqlik samaradorligi absorber yuzasida yuzaga keladigan issiqlik yo'qotishlari bilan cheklanadi. Absorberdan konvektiv va radiatsion mexanizmlar orqali atrof-muhitga va shisha qoplama orqali issiqlik yo'qotiladi, natijada quyosh nurlanishidan foydalanish darajasi pasayadi [1,3].

Ayniqsa, absorberning nurlanish koeffitsienti ( $\epsilon$ ) yuqori bo'lganda, yuqori haroratlarda radiatsion yo'qotishlar sezilarli darajada ortadi [12].

Havo issiqlik tashuvchi sifatida nisbatan past issiqlik sig'imiga ega bo'lgani sababli, absorberdan havo oqimiga issiqlik uzatish jarayoni yetarli darajada intensiv kechmasligi mumkin, bu holat chiqish havosi haroratining pasayishiga olib keladi [4].

Quyosh havo qizdirgichlarining issiqlik samaradorligini oshirish maqsadida adabiyotlarda turli konstruktiv yechimlar taklif etilgan. Ularning asosiy qismi oqim kanalida sun'iy notekisliklar yaratish, turbulizatorlar o'rnatish yoki havo oqimi yo'nalishini murakkablashtirish usullaridan foydalanishga qaratilgan [5,6,7].

Bunday yechimlar issiqlik almashinuvi koeffitsientining oshishiga olib kelsa-da, oqim kanalida sun'iy qarshiliklarning paydo bo'lishi bosim yo'qotishlari va qo'shimcha energiya sarfini keltirib chiqaradi [5,8].

Bundan tashqari, murakkab konstruktiv shakllar ishlab chiqarish va ekspluatatsiya jarayonlarini qiyinlashtiradi [7,9].

So'nggi yillarda yutuvchi plastina sirtining fizik xossalarini yaxshilashga asoslangan yondashuvlar ham ilmiy tadqiqotlarda taklif etila boshlandi. Bunday usullarda selektiv sirtlardan foydalanilib, quyosh nurlanishini yutish koeffitsientini ( $\alpha$ ) oshirish hamda nurlanish orqali yuzaga keladigan issiqlik yo'qotishlarni kamaytirish maqsad qilinadi [10,13,15].

Keramik va cermet materiallardan tayyorlangan selektiv qoplamalar yutuvchi plastina yuzasida optik selektivlikni ta'minlab,  $\alpha$  qiymatining 0.90–0.96,  $\epsilon$  qiymatining esa 0,05–0,20 oraliqda bo'lishiga imkon beradi [13,14]. Biroq bunday selektiv qoplamalarning quyosh havo qizdirgichlariga nisbatan qo'llanilishi hamda ularni tizimli energiya balansi asosida tahlil qilish masalalari adabiyotlarda yetarli darajada yoritilmagan [14,15].

Shu sababli, geometrik tuzilmani o'zgartirmagan holda, absorber sirtini keramik plyonka bilan modifikatsiya qilish orqali quyosh havo qizdirgichlarining issiqlik samaradorligini oshirish masalasi dolzarb va istiqbolli tadqiqot yo'nalishi sifatida qaraladi. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi quyosh havo qizdirgichining issiqlik samaradorligini energiya balansi modeli asosida baholash hamda uni oddiy konstruksiyadagi quyosh havo qizdirgichi bilan solishtirishdan iborat.

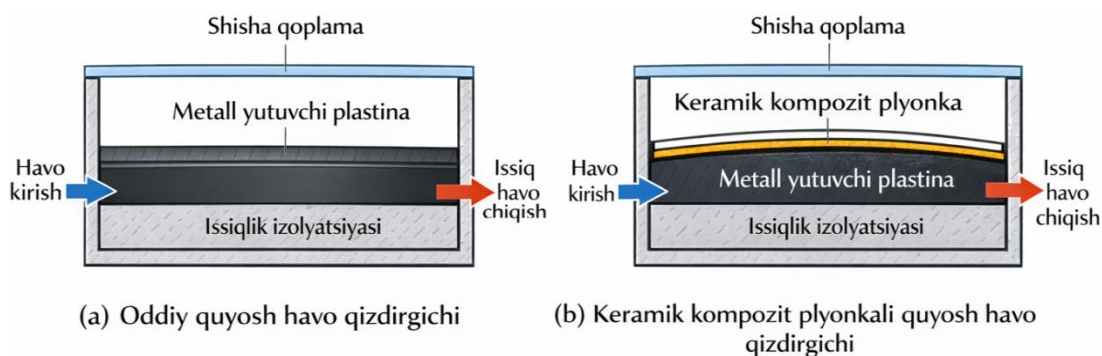
## 2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Mazkur tadqiqotda ikkala qurilma o'rtasidagi farqni faqat absorber sirtining fizik xossalari orqali baholash maqsadida oddiy konstruksiyadagi quyosh havo qizdirgichining absorberiga keramik kompozit plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichi tadqiqot obyekti sifatida tanlandi. Har ikkala qurilma bir xil geometrik o'lchamlar, bir xil havo oqimi kanali tuzilmasi, bir xil shisha qoplama va bir xil issiqlik izolyatsiyasi bilan jihozlangan bo'lib, qurilmalar orasida yuzaga keladigan barcha farqlar faqat absorber sirtining holati bilan bog'liq [4].

Oddiy quyosh havo qizdirgichda absorber metall materialdan tayyorlangan bo'lib, uning asosiy vazifasi tushayotgan quyosh nurlanishini yutish va hosil bo'lgan issiqlikni havo oqimiga uzatishdan iborat. Absorberning yutish koeffitsienti  $\alpha$  va nurlanish koeffitsienti  $\epsilon$  qiymatlari metall sirtning fizik xossalari bilan aniqlanadi [3].

Keramik kompozit plyonkali quyosh havo qizdirgichda esa mazkur metall absorber yuzasi yupqa keramik kompozit plyonka bilan qoplangan. Ushbu plyonka selektiv sirt vazifasini bajarib, quyosh nurlanishini yutish koeffitsientini  $\alpha$  darajasiga oshiradi hamda nurlanish koeffitsientini  $\epsilon$  darajasiga kamaytirish orqali radiatsion issiqlik yo'qotishlarni pasaytirishga xizmat qiladi [10,14].

Keramik kompozit plyonkaning qalinligi juda kichik bo'lgani sababli, metall absorberning issiqlik o'tkazuvchanlik xossalari sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi [16].



**1-rasm.** Oddiy quyosh havo qizdirgichi (a) va keramik kompozit plyonkali quyosh havo qizdirgichi (b) ning sxematik ko'rinishi

**Fig. 1.** Schematic diagram of a conventional solar air heater (a) and a ceramic composite film-based solar air heater (b)

### 3. Natijalar (Results)

Quyosh havo qizdirgichining issiqlik jarayonlarini tahlil qilishda energiya saqlanish qonuniga asoslangan issiqlik balansi yondashuvi qo'llaniladi [4]. Ushbu yondashuv absorberda quyosh nurlanishi hisobiga hosil bo'ladigan foydali issiqlik miqdorini, shuningdek atrof-muhitga yo'qotiladigan issiqlik ulushlarini aniqlash imkonini beradi. Tadqiqotda oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun hisoblashlar bir xil tashki sharoitlar asosida olib borilgan.

Absorberga tushayotgan quyosh radiatsiyasi oqimi faol yuzasi  $A$  va radiatsiya intensivligi  $G$  bilan aniqlanadi:

$$Q_s = A \cdot G; \quad (1)$$

bu yerda  $A$  — absorberning faol yuzasi ( $m^2$ );  $G$  — quyosh radiatsiyasi intensivligi ( $W/m^2$ ).

Absorberda foydali issiqlik hosil bo'lishi quyosh nurlanishining yutilgan qismi va issiqlik yo'qotishlari o'rtasidagi farq bilan belgilanadi [4,18]. Foydali issiqlik oqimi quyidagicha ifodalanadi:

$$Q_f = A \cdot \alpha \cdot G - Q_{yo'q}; \quad (2)$$

bu yerda  $\alpha$  — absorberning quyosh nurlanishini yutish koeffitsienti;  $Q_{yo'q}$  — konvektiv va radiatsion issiqlik yo'qotishlari yig'indisi.

Absorberdan atrof-muhitga radiatsion yo'qotishlar Stefan–Boltzmann qonuniga asoslanib baholanadi [12,18]:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_p^4 - T_a^4); \quad (3)$$

bu yerda  $\varepsilon$  — absorberning nurlanish koeffitsienti;  $\sigma$  — Stefan–Boltzmann doimiysi ( $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K)$ );  $T_p$  — absorber harorati (K);  $T_a$  — atrof-muhit harorati (K).

Absorberdan shisha qoplama va atrof-muhitga konvektiv issiqlik yo'qotishlari esa konvektiv issiqlik uzatish koeffitsienti  $h$  bilan aniqlanadi:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_p - T_a); \quad (4)$$

bu yerda  $h$  — konvektiv issiqlik uzatish koeffitsienti ( $W/(m^2 \cdot K)$ ).

Shunday holda umumiy issiqlik yo'qotishlari yig'indisi:

$$Q_{yo'q} = Q_{rad} + Q_{conv}. \quad (5)$$

Chiqish havosi harorati  $T_{out}$  energiya balansi asosida, kirish harorati  $T_{in}$  va havo oqimining issiqlik sig'imi  $\dot{m} \cdot c_p$  mahsuloti orqali aniqlanadi:

$$Q_f = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}); \quad (6)$$

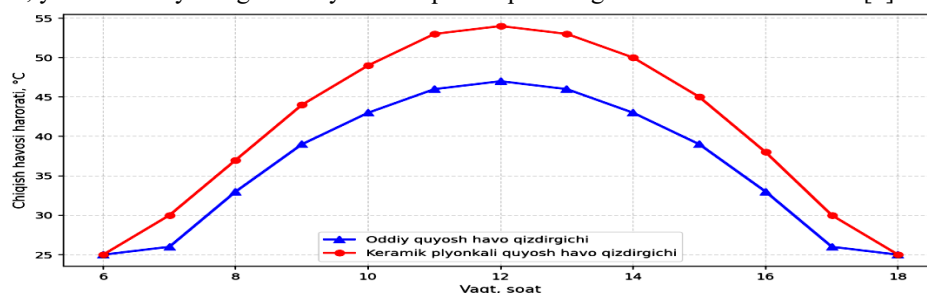
bu yerda  $\dot{m}$  — havo oqimining mass sarfi (kg/s);  $c_p$  — havoning o'ziga xos issiqlik sig'imi ( $J/(kg \cdot K)$ ).

Quyosh havo qizdirgichining umumiy termik samaradorligi foydali issiqlik oqimining tushayotgan quyosh energiyasiga nisbati orqali aniqlanadi [4]:

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_r} A \cdot G; \quad (7)$$

Mazkur ifoda oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun alohida hisoblanib, ularning termik samaradorligi solishtirma tahlil qilinadi. Hisoblashlar davomida barcha tashqi sharoitlar bir xil deb qabul qilinib, natijalarga faqat absorber sirtining modifikatsiyasi ta'siri baholanadi. qurilmada  $\alpha$  va  $\varepsilon$  koeffitsientlari o'zgaradi, bu esa formula (2) ifodasi orqali foydali issiqlik miqdorining ortishiga olib keladi [10, 13, 14].

**Chiqish havosi haroratining vaqt bo'yicha o'zgarishi.** 2-rasmda oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun chiqish havosi harorati  $T_{out}$  ning vaqt bo'yicha o'zgarishi keltirilgan. Har ikkala qurilmada chiqish harorati quyosh radiatsiyasi intensivligining o'zgarishiga qarab tong vaqtdan tush vaqtigacha ortib, undan keyin pasaygan. Bunday ko'rinish  $G(t)$  va  $T_{out}$  o'rtasidagi to'g'ridan-to'g'ri bog'liqlik, ya'ni radiatsiya ortganda foydali issiqlik miqdorining ortishi bilan izohlanadi [4].



**2-rasm.** Oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun chiqish havosi haroratining vaqt bo'yicha o'zgarish grafiği

**Fig.2.** Variation of outlet air temperature with time for the conventional and ceramic composite film-based solar air heaters

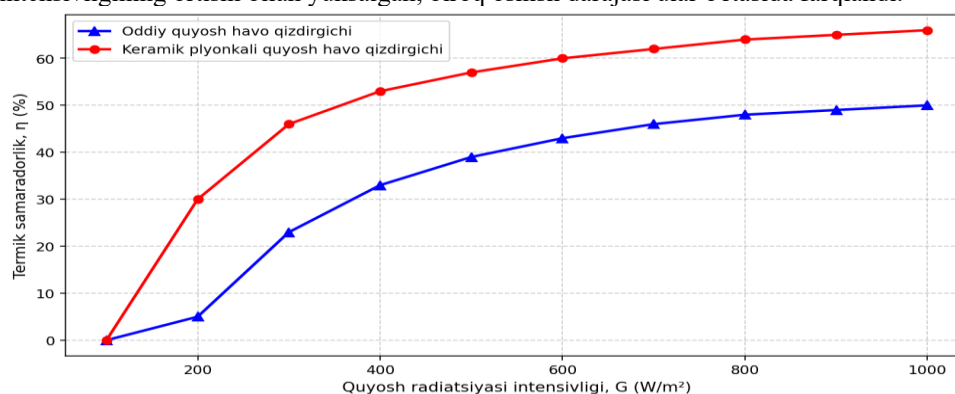


Oddiy quyosh havo qizdirgichda chiqish harorati tush vaqtida  $46.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  darajasiga yetgan. quyosh havo qizdirgichda esa chiqish harorati  $54.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  darajasiga yuksalgan, bu oddiy konstruksiyaga nisbatan  $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  farqni tashkil etgan. Ushbu farq butun kunlik siklda kuzatilgan va radiatsiya intensivligining ortishi bilan birga ortgan.

Kuzatilgan farqning fizik sababi ikkifold: birinchidan, keramik plyonka quyosh nurlanishini yutish koefitsientini  $\alpha = 0.85$  dan  $\alpha = 0.95$  darajasiga oshirgan, shuningdek yutilgan nurlanish miqdorini kuchaytirgan; ikkinchidan, nurlanish koefitsientini  $\varepsilon = 0.90$  dan  $\varepsilon = 0.15$  darajasiga kamaytirib, radiatsion yo'qotishlarni sezilarli darajada pasaytirishga imkon bergan [10,13]. Natijada absorberda hosil bo'lgan foydali issiqlik miqdori ortgan va chiqish havosi harorati yuksalgan.

#### Termik samaradorlikning solishtirilishi

3-Rasm da oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun termik samaradorlik  $\eta$  ning quyosh radiatsiyasi intensivligi  $G$  ga bog'liqligi keltirilgan. Har ikkala qurilmada termik samaradorlik radiatsiya intensivligining ortishi bilan yuksalgan, biroq oshish darajasi ular o'rtasida farqlandi.



**3-rasm.** Oddiy va quyosh havo qizdirgichlar uchun termik samaradorlikning quyosh radiatsiyasi intensivligiga bog'liqlik grafigi

**Fig.3.** Dependence of thermal efficiency on solar radiation intensity for the conventional and ceramic composite film-based solar air heaters

Oddiy quyosh havo qizdirgichda  $G = 500\text{ W/m}^2$  radiatsiya shunday holat qurilma samaradorligining oddiy konstruksiyaga nisbatan  $17\text{--}19\%$  oraliqda oshgan ekanligini ko'rsatadi.

Ushbu farqning asosiy sababi absorber sirtidagi  $\alpha$  va  $\varepsilon$  koefitsientlarining o'zgarishidir. Keramik kompozit plyonka yutish koefitsientini oshirib, nurlanish koefitsientini esa sezilarli darajada kamaytirgan [10,13,14]. Buning natijasida radiatsion yo'qotishlar pasaygan va foydali issiqlik ulushi ortgan. Radiatsiya intensivligining ortishi bilan absorber harorati  $T_p$  oshadi, shuningdek radiatsion yo'qotishlar  $T_p^4$  qonuniga qarab tez ortadi [12]. Aynan shu holat keramik plyonka ( $\varepsilon$ ) bilan oddiy plastina ( $\varepsilon$ ) o'rtasidagi samaradorlik farqini  $G$  ortganda kuchaytiradi.

intensivligida termik samaradorlik  $\eta_1 = 38.9\%$  va  $G = 900\text{ W/m}^2$  intensivlikda  $\eta_1 = 48.6\%$  darajasiga yetgan. quyosh havo qizdirgichda esa bir xil intensivlik qiymatlari uchun samaradorlik  $\eta_2 = 57.5\%$  va  $\eta_2 = 65.1\%$  darajasiga oshgan.

#### 4. Munozara (Discussion)

Olingan natijalar keramik kompozit plyonka bilan absorber sirtini modifikatsiya qilish orqali quyosh havo qizdirgichlarining issiqlik samaradorligini oshirish mumkin ekanligini ko'rsatadi. Termik samaradorlik  $17\text{--}19\%$  oraliqda oshgan, chiqish havosi harorati esa tush vaqtida  $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ortgan. Ushbu natijalar adabiyotlarda keltirilgan selektiv sirt texnologiyasi konseptiga muvofiq keladi [10, 13, 15].

Taklif etilgan yondashuvning muhim ustunligi shundaki, keramik kompozit plyonka qo'llanilganda oqim kanalining geometriyasi o'zgartirilmagan va qurilmada qo'shimcha bosim yo'qotishlari yuzaga kelgan. Mavjud adabiyotlarda taklif etilgan konstruktiv yechimlar turbulizator o'rnatish, sun'iy notekislik yaratish issiqlik almashuvni kuchaytirsa-da, ayniqsa oqim kanalida sun'iy qarshiliklarning paydo bo'lishi bosim yo'qotishlari va qo'shimcha energiya sarfini keltirib chiqaradi [5,8].

Sirt modifikatsiyasi yondashuvi bunday cheklovdan xoli ekan. Keramik kompozit plyonka yuqqa qoplama sifatida absorberning issiqlik o'tkazuvchanlik xossalari sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi [16].

Bu holat plastinadan havo oqimiga issiqlik uzatish jarayonini cheklamaydi va qurilmaning umumiy tuzilmasi o'zgartirilmasdan fayda olish imkonini beradi. Shuningdek, yuqqa keramik



kompozit plyonkalar asosidagi selektiv sirt qoplamalarining termik stabiligi va yuqori haroratlarda sirt xossalarini saqlab qolishi ilmiy tadqiqotlarda tasdiqlangan [14].

Olingan natijalar quyosh havo qizdirgichlarini quyosh issiqlik tizimlarida samarali qo'llash imkoniyatlarini kengaytirishga xizmat qiladi. Xususan, quyosh havo qizdirgichlar issiqlik akkumulyatorlari va biogaz qurilmalari bilan birga tizim sifatida qo'llanilgan holda, butun tizimning energiya samaradorligini oshirish uchun amaliy yechim sifatida qaraladi [16, 17].

## 5. Xulosa (Conclusion)

Mazkur tadqiqotda metall absorber yuzasi yupqa funksional keramik kompozit plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichining issiqlik samaradorligi energiya balans modelini asosida tizimli ravishda tahlil qilindi va oddiy konstruksiyadagi quyosh havo qizdirgichi bilan bir xil ish sharoitlarida solishtirildi. Tadqiqot natijalari absorber sirtining fizik xossalarini modifikatsiya qilish orqali qurilmaning issiqlik samaradorligini sezilarli darajada oshirish mumkinligini ilmiy jihatdan asoslab berdi.

Hisoblash natijalariga ko'ra, keramik kompozit plyonka bilan qoplangan quyosh havo qizdirgichning umumiy termik samaradorligi oddiy konstruksiyaga nisbatan 17–19 % oraliqda oshgani aniqlandi. Ushbu oshish absorber sirtining quyosh nurlanishini yutish koeffitsientining  $\alpha = 0.85$  dan  $\alpha = 0.95$  gacha ortishi hamda nurlanish koeffitsientining  $\varepsilon = 0.90$  dan  $\varepsilon = 0.15$  gacha kamayishi bilan izohlanadi. Natijada radiatsion issiqlik yo'qotishlar sezilarli darajada pasayib, foydali issiqlik ulushi oshgan.

Shuningdek, tadqiqot natijalari chiqish havosi haroratining maksimal qiymati oddiy qurilmada 46.7 °C, keramik plyonkali qurilmada esa 54.1 °C ga yetishini ko'rsatdi. Ya'ni, chiqish haroratidagi 7.4 °C farq butun kunlik ish sikli davomida saqlanib, absorber sirtining selektiv xossalari quyosh radiatsiyasi intensivligi oshgan sari yanada samarali ishlashini tasdiqladi.

Taklif etilgan yondashuvning muhim ilmiy-amaliy ustunligi shundaki, issiqlik samaradorligi oshishi oqim kanalining geometriyasini o'zgartirmagan holda va qo'shimcha bosim yo'qotishlarsiz erishildi. Bu holat adabiyotlarda keng qo'llaniladigan turbulizatorlar va sun'iy notekisliklarga asoslangan konstruktiv yechimlardan farqli ravishda, qurilmaning energiya tejamkorligi va ekspluatatsion ishonchligini oshirish imkonini beradi.

Olingan natijalar asosida shuni ta'kidlash mumkinki, absorber sirtini keramik kompozit plyonka bilan modifikatsiya qilishga asoslangan yondashuv quyosh havo qizdirgichlarining issiqlik samaradorligini oshirish uchun samarali, texnologik jihatdan sodda va istiqbolli yechim hisoblanadi. Ushbu yondashuv quyosh issiqlik tizimlarida, jumladan, issiqlik akkumulyatorlari va biogaz qurilmalari bilan integratsiyalashgan kompleks energiya tizimlarida qo'llash uchun ilmiy va amaliy asos yaratadi.

Mazkur tadqiqot natijalari kelgusida keramik selektiv qoplamalarning real eksperimental sharoitlarda sinovdan o'tkazilishi, ularning uzoq muddatli termik barqarorligi va iqtisodiy samaradorligini baholashga qaratilgan izlanishlar uchun nazariy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

## ADABIYOT

1. Srivastava R.K., Rai A.K. Обзор технологий солнечных воздухонагревателей // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8(7). P. 1122-1131.
2. Singh V.P., Jain S., Karn A., Kumar A., Dwivedi G., Meena C.S., Dutt N., Ghosh A. Последние разработки и достижения в солнечных воздухонагревателях: Подробный обзор // Sustainability. 2022. Vol. 14. Article 12149. <https://doi.org/10.3390/su141912149>.
3. Rajesh S., Vinay Kumar V., Sai Ram J. Оценка характеристик устойчивого солнечного воздухонагревателя (SAH) с использованием различных профилей пластин абсорбера // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 312. 012023.
4. Agrawal B., Agrawal P., Agrawal S. Математическое моделирование и симуляция солнечного воздухонагревателя // International Journal of Engineering Research and Applications. 2020. Vol. 10(12). P. 35-46. <https://doi.org/10.9790/9622-1012023546>.
5. Egab K., Oudah S.K., Al-Manea A., Hasan H., Arici M. Оценка тепловых характеристик U-образных препятствий с прямоугольной перфорацией в солнечном воздухонагревателе // Case Studies in Thermal Engineering. 2025. Vol. 75. Article 107127.
6. Nain S., Ahlawat V., Kajal S., Parinam A., Sharma A., Singh T. Анализ характеристик различных U-образных теплообменников в параболическом желобковом солнечном коллекторе для применения в системах воздушного отопления // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 25. Article 100949.
7. Kumar R., Singh A.K., Patel D. Литературный обзор солнечного воздухонагревателя с шероховатым каналом, имеющим S-образную проволоку // Journal of Emerging Technologies and



Innovative Research (JETIR). 2023. Vol. 10(8).

8. Yadav A.S., Samant T.S., Varshney L. CFD-анализ солнечного воздухонагревателя с V-образными перфорированными блоками на пластине абсорбера // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2(2). P. 822-829.

9. Suzah Z.N., Hamad A.J., Khalifa A.H.N. Повышение производительности двухпроходного солнечного воздухонагревателя с использованием материалов с фазовым переходом и турбулизаторов воздушного потока // Journal of Engineering and Sustainable Development. 2025. Vol. 29(5). <https://doi.org/10.31272/jeasd.2498>.

10. Wang C., Ning Y., Song P., Wu Y., Xue Y., Liu Y., Bousquet A., Tomasella E. Солнечные селективные поглощающие покрытия, полученные методом физического осаждения из паровой фазы: Обзор различных стратегий повышения производительности и эффективности фототермального преобразования // Chemical Engineering Transactions. 2021. Vol. 84. P. 1-6. <https://doi.org/10.3303/CET2184006>.

11. Farchado M., San Vicente G., Barandica N., Sanchez-Señor D., Morales Á. Высокопроизводительный селективный солнечный поглотитель, стабильный на воздухе для высокотемпературных применений // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2024. Vol. 271. Article 112849. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112849>.

12. Setién-Fernández I., Echániz T., González-Fernández L., Pérez-Sáez R.B., Céspedes E., Sánchez-García J.A., Álvarez-Fraga L., Escobar-Galindo R., Albella J.M., Prieto C., Tello M.J. Первое исследование спектральной излучательной способности солнечного селективного покрытия в диапазоне температур 150-600 °C // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2013. Vol. 117. P. 390-395.

13. Cao F., McEnaney K., Chen G., Ren Z. Обзор спектрально-селективных солнечных поглотителей на основе кермета // Energy & Environmental Science. 2014. Vol. 7. P. 1615-1627. <https://doi.org/10.1039/C3EE43825B>

14. Wang H. Структура, оптические свойства и термическая стабильность полностью керамических солнечных селективных поглощающих покрытий: Мини-обзор // Frontiers in Energy Research. 2021. Vol. 9. Article 789917. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.789917>.

15. Zayed M.E. Последние достижения в солнечных термальных селективных покрытиях для применения в солнечной энергетике: Категоризация технологий, методы подготовки и индуцированные механизмы старения // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Article 8438. <https://doi.org/10.3390/app14188438>.

16. Chung K.M., Zeng J., Adapa S.R., Feng T., Bagepalli M.V., Loutzenhiser P.G., Albrecht K.J., Ho C.K., Chen R. Измерение и анализ теплопроводности керамических частиц для хранения солнечной тепловой энергии // Solar Energy. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111271>.

17. Díaz-Herrezuelo I., Miranzo P., Soum-Glaude A., Escape C., Falcoz Q., Belmonte M. Поведение при хранении тепловой энергии 3D керамических/расплавленных солевых структур при реальном концентрированном солнечном излучении // Journal of the European Ceramic Society. 2025. Vol. 45. Article 116975. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116975>.

18. Юлдошев И.А., Султонов М.К., Юлдашев Ф.М. Солнечная энергетика: учебник. Ташкент: ТашГТУ, 2021. -280 с.

## REFERENCES

1. Srivastava R.K., Rai A.K. A review on solar air heater technology // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8(7). P. 1122-1131.

2. Singh V.P., Jain S., Karn A., Kumar A., Dwivedi G., Meena C.S., Dutt N., Ghosh A. Recent developments and advancements in solar air heaters: A detailed review // Sustainability. 2022. Vol. 14. Article 12149. <https://doi.org/10.3390/su141912149>.

3. Rajesh S., Vinay Kumar V., Sai Ram J. Performance assessment of a sustainable solar air heater (SAH) by using different profiles of absorber plates // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 312. 012023.

4. Agrawal B., Agrawal P., Agrawal S. Mathematical modelling and simulation of solar air heater // International Journal of Engineering Research and Applications. 2020. Vol. 10(12). P. 35-46. <https://doi.org/10.9790/9622-1012023546>.

5. Egab K., Oudah S.K., Al-Manea A., Hasan H., Arıcı M. Thermal performance evaluation of U-shaped obstacles with rectangle perforation in solar air heater // Case Studies in Thermal Engineering. 2025. Vol. 75. Article 107127.

6. Nain S., Ahlawat V., Kajal S., Parinam A., Sharma A., Singh T. Performance analysis of different U-shaped heat exchangers in parabolic trough solar collector for air heating applications // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 25. Article 100949.

7. Kumar R., Singh A.K., Patel D. A literature review on solar air heater with roughened duct having S-shaped wire // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR). 2023. Vol.



10(8).

8. Yadav A.S., Samant T.S., Varshney L. A CFD based analysis of solar air heater having V-shaped perforated blocks on absorber plate // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2015. Vol. 2(2). P. 822-829.

9. Suzah Z.N., Hamad A.J., Khalifa A.H.N. Performance enhancement of double-pass solar air heater using phase change materials and air flow turbulators // *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2025. Vol. 29(5). <https://doi.org/10.31272/jeasd.2498>.

10. Wang C., Ning Y., Song P., Wu Y., Xue Y., Liu Y., Bousquet A., Tomasella E. Solar selective absorbing coatings obtained by physical vapor deposition: Overview of different strategies for increasing performance and efficiency of photothermal conversion // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 84. P. 1-6. <https://doi.org/10.3303/CET2184006>.

11. Farchado M., San Vicente G., Barandica N., Sanchez-Señor D., Morales Á. High performance selective solar absorber stable in air for high temperature applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 271. Article 112849. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112849>.

12. Setián-Fernández I., Echániz T., González-Fernández L., Pérez-Sáez R.B., Céspedes E., Sánchez-García J.A., Álvarez-Fraga L., Escobar-Galindo R., Albella J.M., Prieto C., Tello M.J. First spectral emissivity study of a solar selective coating in the 150-600 °C temperature range // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013. Vol. 117. P. 390-395.

13. Cao F., McEnaney K., Chen G., Ren Z. A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers // *Energy & Environmental Science*. 2014. Vol. 7. P. 1615-1627. <https://doi.org/10.1039/C3EE43825B>.

14. Wang H. Structure, optical properties and thermal stability of all-ceramic solar selective absorbing coatings: A mini review // *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. Article 789917. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.789917>.

15. Zayed M.E. Recent advances in solar thermal selective coatings for solar power applications: Technology categorization, preparation methods, and induced aging mechanisms // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article 8438. <https://doi.org/10.3390/app14188438>.

16. Chung K.M., Zeng J., Adapa S.R., Feng T., Bagepalli M.V., Loutzenhiser P.G., Albrecht K.J., Ho C.K., Chen R. Measurement and analysis of thermal conductivity of ceramic particle beds for solar thermal energy storage // *Solar Energy*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111271>.

17. Díaz-Herrezuelo I., Miranzo P., Soum-Glaude A., Escape C., Falcoz Q., Belmonte M. Thermal energy storage behaviour of 3D ceramic/molten salt structures under real concentrated solar radiation // *Journal of the European Ceramic Society*. 2025. Vol. 45. Article 116975. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116975>.

18. Yuldoshev I.A., Sultonov M.Q., Yuldashev F.M. *Solar energy: textbook*. Tashkent: TashSTU, 2021. 280 p.