

**TABIIY KONVEKSIYALI QUYOSH QURITISH QURILMASINING 4E
SAMARADORLIGINI TADQIQ ETISH**

Davlonov Xayrulla Allamurotovich-PhD, professor,
<https://orcid.org/0000-0001-7444-9853> e-mail: davlonov88@mail.ru
Norboyev Zafar Xayrulla o'g'li-tayanch doktorant

Qarshi Davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Jahonda tabiiy konveksiya quyosh quritish qurilmalarining energiya samaradorligini oshirish va qishloq xo'jaligi mahsulotlarini sifatli quritishni ta'minlashga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar jadal rivojlanmoqda.

Usul va materiallar. Ushbu maqolada issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiya quyosh quritish qurilmasining energetik, eksergetik, iqtisodiy va ekologik (4E) samaradorligi termodinamik hisoblash usuli asosida tadqiq qilingan. Qurilmaning konstruktiv va issiqlik-texnik parametrlari nazariy va eksperimental usullar yordamida o'rganildi.

Natijalar. Tajribaviy tadqiqotlar 2026-yil aprel oyida o'rik mahsulotini quritish jarayonida amalga oshirildi. Tajribaviy tadqiqot natijalarga ko'ra, mahsulot massasi 68,5 kg dan 38 kg gacha kamayib, namlikning chiqarilishi 30,5 kg ni tashkil etdi. Quritish kamerasidagi maksimal harorat 64 °C ga yetdi, issiqlik akkumulyatori hisobiga kechki vaqtlarda ham haroratning barqarorligi ta'minlandi. Qurilmaning energetik samaradorligi 31,8 %, eksergetik samaradorligi 18,7 % ni tashkil etdi. Qurilmaning qoplash muddati 2,98 yil bo'lib, yillik iqtisodiy samara 4,2 mln so'mga teng ekanligi aniqlandi. Shuningdek, yiliga 2150 kWh energiya tejallishi va 877 kg CO₂ emissiyasining kamayishi qayd etildi.

Xulosa. Olingan natijalar issiqlik akkumulyatorli quyosh quritish qurilmalarining energiya samaradorligini oshirish va amaliyotga joriy etish istiqbollarini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: Quyosh quritgich, tabiiy konveksiya, quyosh havo qizdirgichi, issiqlik akkumulyatori, qishloq xo'jaligi mahsulotlari, energiya samaradorligi, eksergetik samaradorlik, iqtisodiy samaradorlik, ekologik samaradorlik, 4E tahlil, qayta tiklanuvchi energiya manbalari.

Дата поступления: 14.05.2026. После обработки: 20.05.2025 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Davlonov Kh.A., Norboev Z.Kh. Investigation of the 4E Performance of a Natural Convection Solar Dryer. Alternative Energy. 2026. 2(23). pp. 79-85. (In Uz.)

УДК: 697.329:620.91:66.047

**ИССЛЕДОВАНИЕ 4Е-ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ
СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ**

Давлонов Хайрулла Алламуротович - PhD, профессор,
<https://orcid.org/0000-0001-7444-9853> e-mail: davlonov88@mail.ru
Норбоев Зафар Хайрулла угли - базовый докторант

Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. В настоящее время в мире активно развиваются научные исследования, направленные на повышение энергетической эффективности солнечных сушильных установок с естественной конвекцией и обеспечение качественной сушки сельскохозяйственной продукции.



Методы и материалы. В данной статье на основе методов термодинамического анализа исследована энергетическая, эксергетическая, экономическая и экологическая (4E) эффективность солнечной сушильной установки с естественной конвекцией, интегрированной с солнечной воздушонагревательной системой, оснащённой тепловым аккумулятором. Конструктивные и теплотехнические параметры установки изучены теоретическими и экспериментальными методами.

Результаты. Экспериментальные исследования были проведены в апреле 2026 года при сушке абрикосов. Согласно полученным результатам, масса продукта уменьшилась с 68,5 до 38 кг, а количество удалённой влаги составило 30,5 кг. Максимальная температура в сушильной камере достигала 64 °С. Благодаря использованию теплового аккумулятора обеспечивалась стабильность температурного режима в вечерние часы. Энергетическая эффективность установки составила 31,8 %, эксергетическая эффективность - 18,7 %. Срок окупаемости установки составил 2,98 года, а годовой экономический эффект достиг 4,2 млн сумов. Кроме того, зафиксирована экономия электроэнергии в объёме 2150 кВт·ч в год и снижение выбросов CO₂ на 877 кг в год.

Заключение. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения солнечных сушильных установок с тепловым аккумулятором и возможность повышения их энергетической эффективности в практических условиях.

Ключевые слова: солнечная сушилка, естественная конвекция, солнечный воздушонагреватель, тепловой аккумулятор, сельскохозяйственная продукция, энергетическая эффективность, эксергетическая эффективность, экономическая эффективность, экологическая эффективность, 4E-анализ, возобновляемые источники энергии.

UDC: 697.329:620.91:66.047

INVESTIGATION OF THE 4E PERFORMANCE OF A NATURAL CONVECTION SOLAR DRYER

Davlonov Khayrulla Allamurotovich – PhD, Professor,
<https://orcid.org/0000-0001-7444-9853> e-mail: davlonov88@mail.ru
Norboev Zafar Khayrulla ugli – Doctoral Researcher

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Scientific research aimed at improving the energy efficiency of natural convection solar drying systems and ensuring high-quality drying of agricultural products is rapidly developing worldwide.

Methods and Materials. This paper investigates the energy, exergy, economic, and environmental (4E) performance of a natural convection solar dryer integrated with a thermal energy storage solar air heating system using thermodynamic analysis methods. The structural and thermal-technical parameters of the system were studied through both theoretical and experimental approaches.

Results. Experimental investigations were conducted in April 2026 during the drying of apricot products. The results showed that the product mass decreased from 68.5 kg to 38 kg, while the amount of removed moisture reached 30.5 kg. The maximum temperature inside the drying chamber reached 64 °C. Owing to the thermal energy storage unit, stable temperature conditions were maintained during evening hours. The energy efficiency and exergy efficiency of the system were found to be 31.8% and 18.7%, respectively. The payback period of the system was 2.98 years, while the annual economic benefit amounted to 4.2 million UZS. In addition, annual electricity savings of 2,150 kWh and a reduction of 877 kg of CO₂ emissions were achieved.



Conclusion. *The obtained results confirm the potential for practical implementation of solar drying systems equipped with thermal energy storage units and demonstrate their capability to improve energy efficiency and environmental performance.*

Keywords: *solar dryer, natural convection, solar air heater, thermal energy storage, agricultural products, energy efficiency, exergy efficiency, economic efficiency, environmental efficiency, 4E analysis, renewable energy sources.*

Kirish

Jahonda quyosh energiyasi asosida ishlaydigan, tabiiy konveksiyaga asoslangan quyosh quritish qurilmalarining konstruksiyalarini takomillashtirish, yangi quyosh quritish qurilmalarini ishlab chiqish, ularning energiya samaradorligini oshirish hamda qishloq xo'jaligi mahsulotlari va dorivor o'simliklarni sifatli quritishni ta'minlashga qaratilgan ilmiy-amaliy ishlar keng ko'lamda amalga oshirilmoqda. Aholi ekologik jihatdan toza va sifatli oziq-ovqat mahsulotlariga bo'lgan talabining ortishi, qishloq xo'jaligi, oziq-ovqat mahsulotlarini saqlash va qayta ishlash jarayonlarida energiya sarfini, shuningdek energiya isrofini kamaytirish zarurati quyosh energiyasidan samarali foydalanishga asoslangan quyosh quritish texnologiyalarini rivojlantirishni talab etmoqda. Shu sababli, rivojlangan mamalakatlarda, jumladan, O'zbekistonda ham energiya tejankor, ekologik xavfsiz va texnik-iqtisodiy jihatdan samarali quyosh quritish qurilmalarini yaratishga alohida e'tibor qaratilmoqda [1,2].

Ushbu yo'nalishda tabiiy konveksiya asosida ishlovchi bilvosita quyosh quritgichlarini takomillashtirish, quyosh havo qizdirish tizimlarining konstruktiv parametrlarini optimallashtirish, issiqlik almashinuv jarayonlarini sonli va kompyuter modellashtirish, quritish jarayonining kinetikasini chuqur o'rganish hamda 4E (energetik, eksergetik, iqtisodiy va ekologik) tahlillari asosida quyosh quritish qurilmalarining samaradorligini baholash ustuvor ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Xususan, issiqlik energiyasini akkumulyatsiyalovchi materiallardan foydalanish orqali quyosh radiatsiyasi o'zgaruvchanligi ta'sirini kamaytirish, quritgichning kechki va bulutli ob-havo sharoitlarida ham uzluksiz ishlashini ta'minlash, quritish vaqtini qisqartirish hamda mahsulot sifatini saqlab qolish bo'yicha tadqiqotlar ham olib borilmoqda [2].

So'nggi yillarda quyosh quritish qurilmalarini issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirgichlari bilan integratsiyalash asosida qurilmaning energiya samaradorligini oshirish, quritish kamerasida haroratning barqaror taqsimlanishini ta'minlash va energiya yo'qotishlarini kamaytirish bo'yicha innovatsion texnologiyalar ishlab chiqilmoqda. Bunda faza o'zgaruvchan materiallar (PCM), toshli va metall issiqlik akkumulyatorlari, yangi akkumulyator materiallarini hamda kombinatsiyalashgan issiqlikni akkumulyatsiyalash tizimlaridan foydalanish ham alohida ahamiyat kasb etmoqda [3].

Shu bilan birga, dorivor o'simliklarni quritish jarayonida biologik faol moddalarning saqlanishini ta'minlash, quritish haroratini optimal boshqarish, energiya sarfini kamaytirish hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida ishlovchi yuqori samarali quyosh quritish qurilmalarini yaratish dolzarb ilmiy va amaliy vazifalardan biri hisoblanadi. Shu sababli, issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan quyosh quritgich qurilmasini ishlab chiqish, uning konstruktiv va issiqlik-texnik parametrlarini asoslash, 4E samaradorligini tadqiq etish hamda amaliyotga joriy etish muhim ilmiy-texnik vazifa hisoblanadi [4].

Usul va materiallar

Ushbu tadqiqot ishining maqsadi - issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining konstruksiyasini takomillashtirish, uning 4E samaradorligini, foydali ish koeffitsiyentini hamda quritish jarayonining barqarorligini oshirishdan iborat. Takomillashtirilgan quyosh quritgich qurilmasida qishloq xo'jaligi va dorivor o'simliklarni quritish jarayonining issiqlik va massa almashinuvi, havo oqimining aerodinamik xususiyatlari, issiqlik akkumulyatorining energiya zaxralash va uzatish samaradorligi hamda quritish kamerasida harorat taqsimoti eksperimental va nazariy jihatdan tadqiq etildi. Olingan natijalar qurilmaning 4E samaradorligini baholash, quritish jarayonini intensivlashtirish hamda issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan



integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining konstruktiv va issiqlik-texnik parametrlarini optimallashtirish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining energetik, eksergetik, iqtisodiy va ekologik (4E) samaradorligini quyidagicha ifodalaymiz.

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining energiya samaradorligini quyidagi tenglama yordamida aniqlaymiz:

$$\eta_e = \frac{m_n \cdot h_{sb}}{q_r \cdot F_{qk} \cdot t} \quad (1)$$

Bu yerda, m_n – qishloq xo'jaligi mahsulotlari va dorivor o'simliklardan chiqariladigan namlik miqdori, kg; h_{sb} – suvning bug'lanish issiqligi, kJ/kg; q_r – quyosh radiatsiyasi miqdori, W/m²; F_{qk} – quyosh havo qizdirish tizimi yuzasi, m²; t – qishloq xo'jaligi mahsulotlari va dorivor o'simliklarni quritish vaqti, sek.

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining eksergetik samaradorligini quyidagi tenglama yordamida aniqlaymiz:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{chiq}}{Ex_{kir}} \quad (2)$$

Bu yerda, Ex_{chiq} – issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasiga kiruvchi eksergiya miqdori, W, ya'ni, quyosh radiatsiyasi bilan quyosh havo qizdirish tizimi issiqlik almashinuv yuzasiga kelayotgan eksergiya. Ushbu eksergiyani quyidagi tenglama yordamida hisoblaymiz:

$$Ex_{kir} = Ex_{quyosh} \quad (3)$$

yoki, Petala tenglamasi yordamida aniqlaymiz:

$$Ex_{quyo} = q_r \cdot F_{qk} \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{T_m}{T_q} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_m}{T_q} \right)^4 \right] \quad (4)$$

Bu yerda, T_m – atrof-muhit harorati, K; T_q – Quyoshning effektiv harorati, K ($T_q = 5778$ K);

$$Ex_{chiq} = g_h \cdot c_p \cdot \rho_h \left[(T_{chi} - T_{kir}) - T_m \ln \left(\frac{T_{chi}}{T_{kir}} \right) \right] \quad (5)$$

Bu yerda, g_h – havoning sarfi, kg/sek; c_p – havoning izobarik issiqlik sig'imi, kJ/kg·K; T_{chi} , T_{kir} – quyosh havo qizdirish tizimiga kirishdagi va chiqishdagi havo harorati, K.

4 va 5 tenglamalardan kelib chiqib, 2 tenglamani quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$\eta_{ex} = \frac{q_r \cdot F_{qk} \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{T_m}{T_q} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_m}{T_q} \right)^4 \right]}{g_h \cdot c_p \cdot \rho_h \left[(T_{chi} - T_{kir}) - T_m \ln \left(\frac{T_{chi}}{T_{ki}} \right) \right]} \quad (6)$$

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining iqtisodiy samaradorligini quyidagi tenglama yordamida aniqlaymiz:

$$PP = \frac{C_{invest}}{S_{ann}} \quad (7)$$

Buy yerda, C_{invest} – issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasini yaratish uchun dastlabki investitsiya xarajati, so'm; S_{ann} – issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasidan olinadigan iqtisodiy samara (tejaladigan mablag'), so'm/yil.

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining ekologik samaradorligini quyidagi tenglama yordamida aniqlaymiz:

$$M_{CO_2} = E_{te} \cdot EF \quad (8)$$

Bu yerda, E_{te} – tejalgan energiya, kW/yil; EF – emissiya koeffitsienti, kgCO₂/kWh.

Tejalgan energiyani quyidagi ifoda yordamida hisoblaymiz:



$$E_{te} = \frac{Q_{quyosh}}{Q_{yo}^{quyi}} \quad (9)$$

Q_{quyosh} – tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasiga quyosh havo qizdirish tizimi yordamida berilgan energiya, kJ; Q_{yo}^{quyi} –yoqilg‘ining quyi yonish issiqligi, kJ/kg.

Natijalar va muhokamalar

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasida 2026-yil aprel oyida o‘rikni quritish uchun olib borilgan tajribaviy tadqiqotlar natijasi 1-jadval va 1 rasmda keltirilgan.

1-jadval

O‘rik mahsulotini quritishning issiqlik-texnik parametrlari

Vaqt (soat)	O‘rik massasi, (kg)	Quyosh radiatsiyasi, W/m^2	Tashqi muhit harorati, $^{\circ}C$	Quritish kamerasi ichidagi harorat, $^{\circ}C$	Quritish kamerasi ichidagi namlik, %
09:00	68,5	680	31	39	21
10:00	67	778	34	45	24
11:00	64,5	860	35	52	23
12:00	62	936	37	58	22
13:00	60	965	38	61	20
14:00	58	978	38	64	18
15:00	55,5	900	37	64	17
16:00	53	810	36	64	16
17:00	50	620	33	58	15
18:00	45	420	30	48	14
19:00	41	132	27	43	13
20:00	38	0	24	40	12



1-rasm. Tabiiy konveksiyali quyosh quritgichda quritilgan o‘rik mahsulotining tashqi ko‘rinishi.

1-jadvaldagi tajriba natijalariga ko‘ra, quritishga qo‘yilgan 68,5 kg o‘rik mahsulotining massasi quritish jarayonida 38 kg gacha kamayganini ko‘rishimiz mumkin. Natijada, o‘rik mahsuloti massasi 30,5 kg ga kamayib, massa kamayish darajasi 44,5 % ni tashkil etdi. O‘rikni quritish jarayonida quyosh radiatsiyasining eng yuqori qiymati 978 W/m^2 ga, quritish kamerasi ichidagi harorat esa 64 $^{\circ}C$ gacha yetdi. Quyosh quritish qurilmasida issiqlik akkumulyatori mavjudligi sababli quyosh radiatsiyasi kamaygan kechki soatlarda ham quritish kamerasi ichidagi harorat yuqori darajada saqlanib qoldi va 20:00 da tashqi muhit harorati 24 $^{\circ}C$ bo‘lgan holatda quritish kamerasi ichidagi harorat 40 $^{\circ}C$ ni tashkil etdi. Issiqlik akkumulyatorlari o‘rikni quritish jarayonining uzluksiz davom etishini ta‘minlab, qurilmaning energiya samaradorligini oshirishga ta‘sir qiladi. Tadqiqotning ikkinchi kunida, 19 kg quruq o‘rik olindi va uning rangi, ta‘mi va fizik xossalari saqlanib qolganligi quritish jarayonining samarali tashkil etilganligini ko‘rsatadi.



Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasida 2026-yil aprel oyida o'rikni quritish uchun olib borilgan tajribaviy tadqiqotlar natijasining 4E samaradorligi aniqlandi va olingan natijalar 2-jadvalda keltirildi.

2-jadval

Issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasining 4E samaradorlik natijalari

Samaradorlik turi	Ko'rsatkich	Qiymati	Birligi
Energetik samaradorlik	O'rtacha quyosh radiatsiyasi	673	W/m ²
	Ajralgan namlik massasi	30,5	kg
	Energiya samaradorligi, η_e	31,8	%
Eksergetik samaradorlik	O'rtacha tashqi muhit harorati	33,3	°C
	Quritish kamerasidagi maksimal harorat	64	°C
	Eksergetik samaradorlik, η_{ex}	18,7	%
Iqtisodiy samaradorlik	Qurilmaning dastlabki qiymati	12 500 000	so'm
	Yillik iqtisodiy samara	4 200 000	so'm/yil
	Qurilmani qoplash muddati, PP	2,98	yil
Ekologik samaradorlik	Tejalgan elektr energiyasi	2150	kWh/yil
	CO ₂ emissiyasining kamayishi	877	kgCO ₂ /yil
	Qayta tiklanuvchi energiya ulushi	100	%

Xulosa.

Tadqiqot natijalari issiqlik akkumulyatorli quyosh havo qizdirish tizimi bilan integratsiyalashgan tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasi qishloq xo'jaligi mahsulotlari va dorivor o'simliklarni sifatli quritish, energiya sarfini kamaytirish, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish ulushini oshirish hamda atrof-muhitga salbiy ta'sirni kamaytirishda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatdi. Olingan natijalar ushbu tabiiy konveksiyali quyosh quritish qurilmasini qishloq xo'jaligi va oziq-ovqat mahsulotlarini quritish hamda qayta ishlash korxonalarida keng joriy etish yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

- [1]. Khusenov A.A., Uzakov G.N., Rakhimov A.Kh., Ergashev Sh.H. Evaluation of heat losses of the solar greenhouse during the heating season // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 411. – Art. 01025.
- [2]. Ergashev Sh.H., Fayziev T.A., Khusenov A.A. Mathematical modeling of heat regime of underground heat accumulator // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2612. – Art. 030019.



- [3]. To‘xliyev M.M., Ovlayev J.O. Takomillashtirilgan quyosh quritish qurilmasining harorat rejimini tadqiqot qilish // *Innovatsion texnologiyalar*. – Qarshi, 2022. – № 1(45). – B. 36–40.
- [4]. To‘xliyev M.M. Mavsumiy quyosh kollektorlarining samaradorligini oshirish va tadqiqot qilish // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. – Namangan, 2019. – № 2. – B. 49–52.
- [5]. Emad A.A. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the Eastern Province of Saudi Arabia // *Journal of Agricultural Science*. 2012. Vol. 4. Pp. 237–246.
- [6]. Rosegrant M.W., Magalhaes E., Valmonte-Santos R.A., Mason-D’Croz D. Returns to Investment in Reducing Postharvest Food Losses and Increasing Agricultural Productivity Growth // In: *Prioritizing Development: A Cost Benefit Analysis of the United Nations’ Sustainable Development Goals*; Lomborg B. (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2018. Pp. 322–338.
- [7]. Arumugam S., Rangarajan J.M., Brijesh K., Tiwari A.G. Pulse Foods // Brian McKenna (Ed.). 2nd ed. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2021. Pp. 193–212.
- [8]. Bennamoun L., Belhamri A. Design and simulation of a solar dryer for agricultural products // *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 59. Pp. 259–266.