



UO'K: 662.997.31

doi.10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.5

GELIOISSIQXONADA ISSIQLIK NASOSI VA QUYOSH SUV KOLLEKTORIGA ASOSLANGAN KOMBINATSIYALASHGAN ISITISH TIZIMINING ISSIQLIK REJIMINI MODELLASHTIRISH VA TADQIQ ETISH

Uzoqov G'ulom Norboyevich - texnika fanlari doktori, professor,

<https://orcid.org/0009-0005-7386-8075> e-mail: uzoqov66@mail.ru

Ibragimov Umidjon Xikmatullayevich - texnika fanlari doktori, professor,

<https://orcid.org/0009-0008-0582-6713> e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Xusenov Aslam Aktam o'g'li - assistent

<https://orcid.org/0009-0008-1906-3577> e-mail: xusenovaslan@gmail.com

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Gelioissiqxonalarda energiya sarfini kamaytirish va qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish zamonaviy qishloq xo'jaligining dolzarb muammolaridan biridir. Shu sababli issiqlik nasosi va quyosh suv kollektoriga asoslangan kombinatsiyalashgan isitish tizimlarining issiqlik rejimini tadqiq etish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

Usul va materiallar. Tadqiqotlarda foydali maydoni 50 m² bo'lgan gelioissiqxona tanlanib, issiqlik yuklamasi konstruktsiya, shamollatish, infiltratsiya, tuproq va transpiratsiya orqali yuzaga keladigan issiqlik yo'qotilishlari asosida hisoblandi. Issiqlik almashinuvi jarayonlarini tavsiflash uchun energiya balansi tenglamalari tuzildi hamda orqaga Euler usuli yordamida diskret matematik model ishlab chiqildi.

Natijalar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, 11.11.2024 sanasida quyosh energiyasi umumiy issiqlik yuklamasining 49,2% qismini qoplagan bo'lsa, 11.02.2025 sanasida bu ko'rsatkich 15,2% ni tashkil etdi. Gelioissiqxona ichki havosi harorati mavsumiy sharoitga bog'liq ravishda -6,0°C dan 30,7°C gacha o'zgargani aniqlandi. Qish mavsumida qo'shimcha isitish tizimiga bo'lgan talab sezilarli darajada ortishi kuzatildi.

Xulosa. Kombinatsiyalashgan isitish tizimi quyosh energiyasi va tuproqning past potentsialli issiqligidan samarali foydalanish hisobiga gelioissiqxonaning energiya samaradorligini oshirish hamda barqaror mikroiklim rejimini ta'minlash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: gelioissiqxona, issiqlik nasosi, quyosh suv kollektori, issiqlik yuklamasi, energiya samaradorligi, matematik model, issiqlik almashinuvi.

Дата поступления: 15.05.2026. После обработки: 18.05.2026 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Uzakov G.N., Ibragimov U.Kh., Xusenov A.A. Modeling and Investigation of the Thermal Regime of a Combined Heating System based on a Heat Pump and Solar Water Collector in a Solar Greenhouse. Alternative energy. 2026. 2(23). pp. 57-66.

УДК 662.997.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА И СОЛНЕЧНОГО ВОДЯНОГО КОЛЛЕКТОРА В ГЕЛИОТЕПЛИЦЕ

Узаков Гулом Норбоевич - доктор технических наук, профессор,

<https://orcid.org/0009-0005-7386-8075> e-mail: uzoqov66@mail.ru

Ибрагимов Умиджон Хикматуллаевич - доктор технических наук, профессор,



<https://orcid.org/0009-0008-0582-6713> e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Хусенов Аслам Актам угли – ассистент

<https://orcid.org/0009-0008-1906-3577> e-mail: xusenovaslan@gmail.com

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. Снижение энергопотребления в гелиотеплицах и эффективное использование возобновляемых источников энергии являются одними из актуальных проблем современного сельского хозяйства. В связи с этим исследование теплового режима комбинированных систем отопления на основе теплового насоса и солнечного водяного коллектора считается одной из актуальных задач.

Методы и материалы. В исследованиях была выбрана гелиотеплица с полезной площадью 50 м², а тепловая нагрузка рассчитывалась на основе тепловых потерь через конструкцию, вентиляцию, инфильтрацию, грунт и транспирацию. Для описания процессов теплообмена были составлены уравнения энергетического баланса и разработана дискретная математическая модель с использованием обратного метода Эйлера.

Результаты. Согласно результатам исследования, 11.11.2024 солнечная энергия покрывала 49,2% общей тепловой нагрузки, тогда как 11.02.2025 этот показатель составил 15,2%. Установлено, что температура внутреннего воздуха гелиотеплицы изменялась в пределах от -6,0°C до 30,7°C в зависимости от сезонных условий. В зимний период наблюдалось значительное увеличение потребности в дополнительной системе отопления.

Заключение. Комбинированная система отопления позволяет повысить энергоэффективность гелиотеплицы и обеспечить стабильный микроклимат за счёт эффективного использования солнечной энергии и низкопотенциального тепла грунта.

Ключевые слова: гелиотеплица, тепловой насос, солнечный водяной коллектор, тепловая нагрузка, энергоэффективность, математическая модель, теплообмен.

UDC 662.997.31

MODELING AND INVESTIGATION OF THE THERMAL REGIME OF A COMBINED HEATING SYSTEM BASED ON A HEAT PUMP AND SOLAR WATER COLLECTOR IN A SOLAR GREENHOUSE

Uzakov Gulam Norboyevich - DSc, Professor,

<https://orcid.org/0009-0005-7386-8075> e-mail: uzoqov66@mail.ru

Ibragimov Umidjon Khikmatullayevich - DSc, Professor,

<https://orcid.org/0009-0008-0582-6713> e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Xusenov Aslam Aktam ugli - Assistant

<https://orcid.org/0009-0008-1906-3577> e-mail: xusenovaslan@gmail.com

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Reducing energy consumption in solar greenhouses and the efficient use of renewable energy sources are among the urgent problems of modern agriculture. Therefore, investigating the thermal regime of combined heating systems based on a heat pump and a solar water collector is considered one of the актуал issues.

Methods and materials. In the research, a solar greenhouse with a useful area of 50 m² was selected, and the heat load was calculated based on heat losses caused by construction, ventilation, infiltration, soil, and transpiration. To describe the heat exchange processes, energy balance equations were developed and a discrete mathematical model was created using the backward Euler method.

Results. According to the research results, on 11.11.2024 solar energy covered 49.2% of the total heat load, while on 11.02.2025 this indicator amounted to 15.2%. It was determined that the



internal air temperature of the solar greenhouse varied from -6.0°C to 30.7°C depending on seasonal conditions. During the winter season, a significant increase in the demand for an additional heating system was observed.

Conclusion. The combined heating system makes it possible to increase the energy efficiency of the solar greenhouse and ensure a stable microclimate regime through the efficient use of solar energy and the low-potential heat of the soil.

Keywords: solar greenhouse, heat pump, solar water collector, heat load, energy efficiency, mathematical model, heat exchange.

Kirish

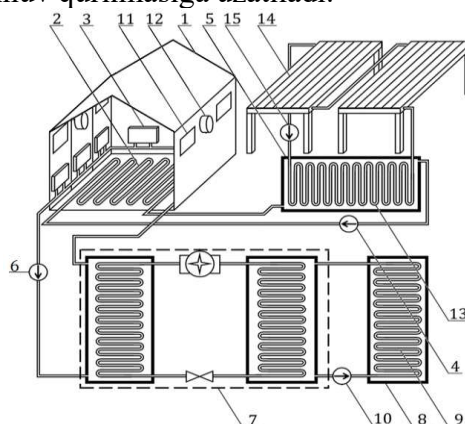
Hozirgi kunda energiya resurslaridan samarali foydalanish va an'anaviy yoqilg'ilarga bo'lgan qaramlikni kamaytirish masalalari dolzarb ahamiyat kasb etmoqda [1-4]. Shu sababli issiqlik nasosi va quyosh suv kollektoridan iborat kombinatsiyalashgan isitish tizimining prinsipial sxemasini ishlab chiqish gelioissiqlixonalarda energiya tejamkorligini oshirishning muhim omili hisoblanib, amaliy va ilmiy jihatdan katta ahamiyatga ega. Mazkur yo'nalishda Ahsan va boshqalar [5] issiq va nam iqlimli hududlar (Houston, Texas) uchun sovitish minorasi bilan integratsiyalangan gibrid tuproq manbali issiqlik nasosi (HGSHP) asosidagi issiqxonaning iqlim nazorati tizimini TRNSYS muhitida dinamik modellashtirish orqali baholagan. Natijalarga ko'ra, HGSHP konfiguratsiyasi faqat GSHP tizimiga nisbatan sovitish energiya sarfini 10,8% gacha kamaytirgan, bunda sovitish minorasi yozgi cho'qqili davrlarda umumiy sovitish yuklamasining 3-37% ini tashqi muhitga chiqarib bergan. Tizimning muhim afzalligi tuproqning termik barqarorligini saqlashda namoyon bo'lib, HGSHP holatida yillik tuproq haroratini o'sishi $0,1^{\circ}\text{C}$ dan kam, GSHP holatida esa taxminan 1°C /yil ni tashkil etgani aniqlangan. Energetik samaradorlik jihatidan, iyul oyida HGSHP o'rtacha $\text{COP} \approx 4,1$ qiymatini saqlab qolgan bo'lsa, GSHP tizimida kirish suyuqligi haroratining 45°C gacha ko'tarilishi sabab COP 2,3 dan past bo'lgan, Olingan natijalar bunday tizimlarning issiqxonalarda barqaror energiya ta'minoti uchun yuqori istiqbolga ega ekanini tasdiqlagan. Zhou va boshqalar [6] mavsumiy issiqxonalarda mavsumdan tashqari gilos yetishtirish uchun PV/T panellar va sovitish minorasi bilan integratsiyalangan gibrid tuproq manbali issiqlik nasosi (HGSHP) tizimini TRNSYS muhitida modellashtirib baholagan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, besh yillik ekspluatatsiya davomida oddiy GSHP tizimida tuproq harorati $6,3^{\circ}\text{C}$ ga oshgan, HGSHP tizimida esa bu ko'rsatkich atigi $0,2^{\circ}\text{C}$ ni tashkil etib, tuproqning issiqlik nomutanosibligi muammosi samarali bartaraf etilgan. PV/T maydoni 40 m^2 , sovitish minorasining issiqlik tarqatish quvvati $70,4\text{ kW}$ bo'lgan holatda HGSHP tizimi umumiy energiya iste'molini GSHPga nisbatan 44425 kWh ga kamaytirgan. Shu bilan birga, tizim tomonidan ishlab chiqarilgan elektr energiyasining 51410 kWh qismi tarmoqqa sotilib, besh yil davomida 46959 CNY miqdorida iqtisodiy foyda ta'minlangan. Keltirilgan tadqiqotlar natijalari issiqxonalarda issiqlik nasosi, quyosh kollektor va fotovoltaiik-termik texnologiyalarni birlashtirgan gibrid tizimlar energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirishi, tashqi energiya manbalariga qaramlikni keskin kamaytirishi hamda CO_2 chiqindilarini sezilarli darajada qisqartirishini ko'rsatadi. Shu bois, gelioissiqlixonalarda issiqlik nasosi va quyosh suv kollektoriga asoslangan kombinatsiyalashgan isitish tizimining prinsipial sxemasini ishlab chiqish barqaror, iqtisodiy va ekologik jihatdan maqbul energiya ta'minotini ta'minlash uchun ilmiy-amaliy jihatdan muhim hisoblanadi.

Tizimning konstruktiv yechimi va ishlash prinsipi

Gelioissiqlixonaning energiya samaradorligini oshirish maqsadida issiqlik nasosi va quyosh suv kollektoridan iborat kombinatsiyalashgan isitish tizimining prinsipial sxemasi ishlab chiqildi (1-rasm). Ushbu tizim QTEMLari asosida ishlovchi bo'lib, quyosh energiyasi va tuproqning past potentsiilli issiqligidan kompleks foydalanishni ta'minlaydi. Gelioissiqlixonaning kombinatsiyalashgan isitish tizimi quyidagi tartibda ishlaydi: plyonka qoplamali gelioissiqlixonaning (1) kombinatsiyalashgan isitish tizimi quyosh suv kollektori (14), tuproq manbali issiqlik nasosi (7), tuproq osti issiqlik almashinuv quvuri (8) hamda issiqlik akkumulyatori vazifasini bajaruvchi suvli bak-akkumulyatorlarning (5) o'zaro integratsiyasi asosida kaskadli issiqlik uzatish asosida ishlaydi. Quyosh radiatsiyasi ta'sirida quyosh suv kollektorida (14) hosil qilingan issiqlik energiyasi issiq suv quvuriga o'rnatilgan sirkulyatsion suv nasosi (15) yordamida suvli bak-akkumulyator (5) ichida



joylashtirilgan spiralsimon issiqlik almashinuv quvuri (13) orqali uzatiladi. Natijada bakdagi issiqlik tashuvchi suyuqlikning harorati oshadi va issiqlik energiyasi suvga akkumulyatsiya qilinadi. Akkumulyatsiya qilingan issiqlik energiyasi sirkulyatsion suv nasosi (4) vositasida suvli issiq pol asosidagi isitish tizimiga (2) uzatiladi, bunda past haroratli, ammo katta issiqlik sig'imiga ega issiqlik tashuvchi suyuqlik issiqxona ichki hajmida va tuproq qatlamida bir tekis issiqlik maydonini shakllantiradi. Quyosh radiatsiyasi intensivligi pasaygan yoki issiqlik yuklamasi ortgan sharoitlarda qo'shimcha issiqlik manbai sifatida tuproq manbali issiqlik nasosi (7) ishga tushiriladi, bunda tuproq massivi (8) ostiga joylashtirilgan tuproq osti issiqlik almashinuv quvuri (9) orqali past potentsialli issiqlik energiyasi sirkulyatsion suv nasosi (10) yordamida issiqlik nasosining bug'latgichi joylashtirilgan issiqlik almashinuv qurilmasiga uzatiladi.



1-rasm. Gelioissiqlxonaning kombinatsiyalashgan isitish tizimining prinsipial sxemasi: 1- gelioissiqlxona; 2-suvli issiq pol asosidagi isitish tizimi; 3-radiatorli isitish tizimi; 4, 6, 10, 15- sirkulyatsion nasos; 5-suvli bak-akkumulyator; 7-tuproq manbali issiqlik nasosi; 8-tuproq massivi; 9-tuproq osti issiqlik almashinuv quvuri; 11-sha-mollatish tuynugi; 12-ventilyator; 13-zmeevikli issiqlik almashinuv quvuri; 14-quyosh suv kollektori

Bug'latgichda past haroratli issiqlik ishchi moddaga (freon) uzatiladi. Kompessor orqali freonni siqilishi natijasida uning ichki energiyasi keskin oshadi va yuqori potentsialli issiqlik manbai holatiga o'tadi, hosil bo'lgan yuqori potentsialli issiqlik energiyasi kondensator orqali issiqlik tashuvchi suyuqlikka uzatiladi. Yuqori haroratli issiqlik tashuvchi sirkulyatsion suv nasosi (6) yordamida radiatorli isitish tizimi (3) va u orqali konvektiv issiqlik uzatilishi hisobiga issiqxona ichki havo muhitiga uzatiladi. Bu esa issiqxona ichida zarur issiqlik rejimini barqarorlashtirish imkonini beradi, bundan tashqari, issiqxona ichidagi ortiqcha issiqlik energiyasi va namlikni me'yorlashtirish maqsadida shamollatish tuynugi (11) va ventilyator (12) yordamida majburiy konvektiv havo almashinuvi tashkil etiladi. Natijada issiqxona ichki mikroiklim parametrlarining optimal qiymatlari ta'minlanadi. Shu tarzda mazkur kombinatsiyalashgan isitish tizimi quyosh energiyasi va tuproqning past potentsialli issiqlik energiyasidan kompleks foydalanish asosida issiqlik energiyasini ko'p bosqichli konversiya, akkumulyatsiya va uzatish jarayonlarini amalga oshirib, issiqxonaning energiya tejankor, avtonom va yuqori samaradorlikka ega isitish tizimini hamda barqaror mikroiklim rejimini shakllantiradi.

Usul va materiallar

Ma'lumki, gelioissiqlxonaning samarali ishlashi, avvalo, uning issiqlik yuklamasini to'g'ri aniqlashga bog'liq bo'lib, bu ko'rsatkich isitish tizimini tanlash va energiya sarfini baholashda muhim ahamiyatga ega. Issiqlik yuklamasini hisoblash jarayonida issiqxonaning geometrik o'lchamlari, qoplama materiallari hamda tashqi va ichki muhit haroratlari asosiy aniqlovchi omillar sifatida qaraladi. Ayniqsa, gelioissiqlxonalarda shaffof qoplamalar orqali yuzaga keladigan issiqlik almashinuvi jarayonlarini inobatga olish hisob natijalarining aniqligini oshiradi. Ushbu dissertatsiya tadqiqotida foydali maydoni 50 m^2 bo'lgan gelioissiqlxona tadqiqot obyekti sifatida tanlangan. Issiqxonaning issiqlik yuklamasini aniqlashdan oldin uning konstruktiv va geometrik parametrlarini aniq belgilab olish zarur hisoblanadi, chunki issiqlik yo'qotishlar miqdori bevosita tashqi qoplama yuzalarining o'lchamlariga va shakliga bog'liqdir. Shuning uchun hisoblash jarayonining dastlabki



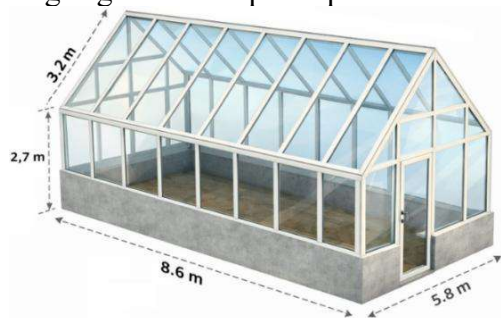
bosqichida gelioissiqxonaning asosiy geometrik o'lchamlari, balandligi hamda qoplama elementlarining shakli va yuzalari aniqlanadi. Mazkur tadqiqotda gelioissiqxona to'rtburchak shaklli reja asosida loyihalaniib, uning uzunligi $L = 8,6 \text{ m}$ va kengligi $B = 5,8 \text{ m}$ ga teng deb qabul qilinadi. Gelioissiqxona konstruksiyasi pastki qismida issiqlik inertsiya xususiyati yuqori bo'lgan $h_1 = 0,7 \text{ m}$ balandlikdagi beton devor, undan yuqorida $h_2 = 2,0 \text{ m}$ balandlikdagi tekis shaklli shisha qoplamali devor hamda yuqori qismida shisha qoplamali ikki tomli cherdakdan (balandligi $h_3 = 1,35 \text{ m}$) iborat deb qaraladi. Bunday konstruktiv yechim issiqxona ichida qulay mikroiqlimni ta'minlash bilan birga, issiqlik yo'qotishlarni kamaytirishga xizmat qiladi. Umumiy devor balandligi:

$$H = h_1 + h_2 = 0,7 + 2 = 2,7 \text{ m}$$

Tomning bir tomi uzunligi (Pifagor teoremasi bo'yicha):

$$l_t = \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + h_3^2} = \sqrt{2,9^2 + 1,35^2} = 3,2 \text{ m}$$

Aniqlangan geometrik o'lchamlar va konstruktiv elementlarning joylashuvi gelioissiqxonaning umumiy ko'rinish sxemasida tasvirlangan bo'lib, ularning o'zaro nisbatlari va asosiy o'lchamlari 2-rasmda keltirilgan. Gelioissiqxonaning issiqlik yuklamasini aniqlashda yuzaga keladigan barcha issiqlik yo'qotilishlarini hisobga olish muhim ahamiyatga ega. Quyida bodring mahsuloti yetishtiriladigan gelioissiqxona misolida sodir bo'ladigan issiqlik yo'qotilishlarining dinamik holatda o'zgarishi tizimli ravishda ko'rib chiqiladi. Ushbu issiqlik yo'qotilishlarining tavsifi 3-rasmda keltirilgan. 3-rasmga ko'ra, gelioissiqxonada umumiy issiqlik yo'qotilishi konstruksiya, shamollatish va infiltratsiya jarayonlari, tuproq orqali hamda o'simliklarning transpiratsiyasi (o'simliklar orqali suv bug'lanishi) natijasida yuzaga keladi. Gelioissiqxonada issiqlik almashinuvi jarayonlarini dinamik holatda tadqiq etishda soddalashtiruvchi va fizik mazmunga ega farazlar qabul qilindi:



2-rasm. Gelioissiqxonaning asosiy geometrik o'lchamlari.



3-rasm. Gelioissiqxonada issiqlik yo'qotilish turlari.

1. Gelioissiqxona ichki havosi issiqlik jihatidan bir jinsli, uning harorati, zichligi va solishtirma issiqlik sig'imi faqat vaqt bo'yicha o'zgaruvchi.
2. Gelioissiqxona konstruksiya materiallarida issiqlikning to'planishi hisobga olinmadi va issiqlik oqimi faqat ichki va tashqi havo haroratlarining joriy qiymatlariga bog'liq deb qaraldi.
3. Umumiy issiqlik uzatish koeffitsiyentlari hisob oralig'ida doimiy deb olinib, ichki va tashqi konvektiv issiqlik almashinuvi koeffitsiyentlari tashqi muhit sharoitlarining o'rtacha qiymatlari asosida aniqlandi.
4. Gelioissiqxonada havo almashinuvi natijasida yuzaga keladigan issiqlik yo'qotilishlari boshqariladigan shamollatish va nazoratsiz infiltratsiya jarayonlariga ajratilgan holda alohida hisobga olindi.
5. O'simliklarning transpiratsiyasida suv bug'lanishiga sarflanadigan yashirin issiqlik dinamik issiqlik balansiga kiritildi.
6. Tuproq bilan issiqlik almashinuvi soddalashtirilgan model asosida ifodalanib, tuproq yarim-cheksiz muhit sifatida qaraldi.



7. Gelioissiqxona ichida yuz beradigan nurlanish orqali issiqlik almashinuvi, lokal havo oqimlari hamda ikkilamchi issiqlik jarayonlarining umumiy issiqlik balansiga ta'siri miqdoran kichik bo'lgani sababli hisoblarda e'tiborga olinmadi.

Dinamik holatda gelioissiqxonada umumiy issiqlik yo'qotilishi vaqt bo'yicha o'zgarib turadi va quyidagi asosiy komponentlardan tashkil topadi:

$$c_{p,i,h}\rho_{i,h}V_{is}\frac{dt_{i,h}(\tau)}{d\tau} = Q_q(\tau) - [Q_k(\tau) + Q_{sh}(\tau) + Q_{inf}(\tau) + Q_t(\tau) + Q_b(\tau)] \quad (1)$$

bu yerda $c_{p,i,h}$ -ichki havoning solishtirma issiqlik sig'imi, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; $\rho_{i,h}$ -ichki havo zichligi, kg/m^3 ; V_{is} -issiqxona hajmi, m^3 .

Yuqoridagi (1) ifodada keltirilgan issiqlik yo'qotilishining har bir tashkil etuvchisini alohida ko'rib chiqamiz.

1. $Q_q(\tau)$ -quyosh radiatsiyasidan gelioissiqxonaga kirayotgan issiqlik oqimi:

$$Q_q = I_q A_{sh,q} \alpha_{yu} \tau_{sh,q} = I_q \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 50 = 32 I_q \quad (2)$$

bu yerda I_q -quyosh nurlanish intensivligi, Vt/m^2 ; $A_{sh,q} = 50 m^2$ -gelioissiqxonaning shisha qoplamasi yuzasi; $\alpha_{yu} = 0,8$ -shisha qoplamaning yutish koeffitsiyenti; $\tau_{sh,q} = 0,8$ -shisha qoplamaning o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti.

2. $Q_k(\tau)$ -issiqxona konstruksiyasi orqali yo'qotilgan issiqlik miqdori:

$$Q_k(\tau) = Q_d(\tau) + Q_{sh,d}(\tau) + Q_t(\tau) = k_d A_d (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) + k_{sh,d} A_{sh,d} (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) + k_t A_t (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) = (k_d A_d + k_{sh,d} A_{sh,d} + k_t A_t) (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) \quad (3)$$

bu yerda A_d , $A_{sh,d}$, A_t -mos ravishda betonli va shishali devor hamda tom yuzasi maydoni, m^2 :

$$A_d = P \cdot h_1 = 28,8 \cdot 0,7 = 20,2 m^2; A_{sh,d} = P \cdot h_2 = 28,8 \cdot 2,0 = 57,6 m^2$$

$$A_{t,u} = 2 \cdot l_t \cdot L = 2 \cdot 3,2 \cdot 8,6 = 55 m^2; A_{t,s} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5,8 \cdot 1,35 = 7,83 m^2$$

$$A_t = A_{t,u} + A_{t,s} = 55 + 7,83 = 62,83 m^2$$

bu yerda $P = 2(L + B) = 2(8,6 + 5,8) = 28,8 m$ -gelioissiqxonaning perimetri; k_d , $k_{sh,d}$, k_t -mos ravishda betonli va shishali devor hamda tom orqali issiqlik uzatish koeffitsiyentlari, $Vt/(m^2 \cdot ^\circ C)$:

$$k_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i,h}} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + \frac{1}{\alpha_{t,h}}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{0,4}{1,7} + \frac{1}{18}} = 2,19 Vt/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$k_{sh,d} = k_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i,h}} + \frac{\delta_{sh,d}}{\lambda_{sh,d}} + \frac{1}{\alpha_{t,h}}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{0,004}{0,9} + \frac{1}{18}} = 4,40 Vt/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

bu yerda $\alpha_{i,h} = 6 Vt/(m^2 \cdot ^\circ C)$ -gelioissiqxona ichki havosidan devorning ichki yuzasiga issiqlik berish koeffitsiyenti; $\alpha_{t,h} = 18 Vt/(m^2 \cdot ^\circ C)$ -gelioissiqxona devorining tashqi yuzasidan tashqi havoga issiqlik berish koeffitsiyenti; $\delta_d = 0,4 m$ va $\delta_{sh,d} = 0,004 m$ -betonli va shisha devorning qalinligi; $\lambda_d = 1,7 Vt/(m \cdot ^\circ C)$ va $\lambda_{sh,d} = 0,9 Vt/(m \cdot ^\circ C)$ -betonli va shisha devorning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti.

Hisoblangan qiymatlarni (2.3) ifodaga quyamiz, u holda

$$Q_k(\tau) = (2,19 \cdot 20,2 + 4,40 \cdot 57,6 + 4,40 \cdot 62,83)(t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) = 574,16 (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) \quad (4)$$

3. $Q_{sh}(\tau)$ -shamollatish orqali issiqlik yo'qotilishi (boshqariladigan):

$$Q_{sh}(\tau) = \rho_{i,h} c_{p,i,h} \frac{V_{sh}(\tau)}{3600} (t_{i,h}(\tau) - t_{t,h}(\tau)) \quad (5)$$

bu yerda $\rho_{i,h} = 1,205 kg/m^3$ -ichki havo zichligi; $c_{p,i,h} = 1005 J/(kg \cdot ^\circ C)$ -ichki havoning solishtirma issiqlik sig'imi; $V_{sh}(\tau)$ -shamollatish orqali havo sarfi, $m^3/soat$:

$$V_{sh}(\tau) = n_{sh}(\tau) V_{is} = 168,3 n_{sh}(\tau) \quad (6)$$

bu yerda $V_{is} = 168,3 m^3$ -issiqxona hajmi; $n_{sh}(\tau)$ -shamollatish intensivligi ($1/soat$). Sutka davomida tungi, kunduzgi va o'tish davrlariga mos ravishda shamollatish intensivligi alohida belgilandi, har bir vaqt oralig'ida shamollatish orqali havo sarfi o'zgarmas deb qabul qilindi: kechasi (00:00-06:00)- $n_{sh} = 0,3 soat^{-1}$, ertalab (06:00-09:00)- $n_{sh} = 0,8 soat^{-1}$, kunduzi (09:00-17:00)- $n_{sh} = 3,0 soat^{-1}$, kechqurun (17:00-20:00)- $n_{sh} = 0,8 soat^{-1}$ va tunda (20:00-24:00)- $n_{sh} = 0,4 soat^{-1}$.

Hisoblangan qiymatlarga asosan (5) ni quyidagi ko'rinishda yozamiz:



$$Q_{sh}(\tau) = 56,62 \cdot n_{sh}(\tau)(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) \quad (7)$$

4. $Q_{inf}(\tau)$ -infiltratsiya orqali issiqlik yo'qotilishi:

$$Q_{inf}(\tau) = \rho_{i.h} c_{p,i.h} V_{inf}(\tau)(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) \quad (8)$$

bu yerda $V_{inf}(\tau)$ -infiltratsiya orqali havo sarfi, m^3/s :

$$V_{inf}(\tau) = \frac{n_{ifl} V_{is}}{3600} = \frac{0,2 \cdot 168,3}{3600} = 0,009 m^3/s \quad (9)$$

bu yerda n_{ifl} -infiltratsiya intensivligi ($1/soat$), yaxshi zichlangan issiqxona uchun- $0,2 soat^{-1}$. Bir sutkalik dinamik modelda infiltratsiya:

$$V_{inf}(\tau) = V_{inf} = const \quad (10)$$

Hisoblangan qiymatlarga asosan (2.8) ni quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$Q_{inf}(\tau) = 11,32(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) \quad (11)$$

5. $Q_t(\tau)$ -tuproq orqali issiqlik yo'qotilishi:

$$Q_t(\tau) = \frac{\lambda_{tup}}{\delta} A_{tup} (t_{i.h}(\tau) - t_{tup}(\tau)) \quad (12)$$

bu yerda $\lambda_{tup} = 1,2 Wt/(m \cdot ^\circ C)$ -tuproqning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti; $\delta = 1,5 m$ -issiqlik oqimi yo'nalishidagi ekvivalent chuqurlik; $A_{tup} = 50 m^2$ -tuproq bilan aloqa qiluvchi sirt maydoni; $t_{tup}(\tau)$ -tuproqning hisobiy chuqurlikdagi harorati, odatda qish faslida $t_{tup} = 12^\circ C$. Dinamik modelda tuproqning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, ekvivalent chuqurligi va harorati o'zgarish deb qabul qilindi, chunki tuproqning issiqlik inertsiya katta bo'lib, bir sutka davomida uning harorati deyarli o'zgarmaydi.

Hisoblangan qiymatlarga asosan (12) ni quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$Q_t(\tau) = 40(t_{i.h}(\tau) - t_{tup}(\tau)) = 40(t_{i.h}(\tau) - 12) \quad (13)$$

6. $Q_b(\tau)$ -bug'lanish (o'simlik transpiratsiyasi) orqali issiqlik yo'qotilishi:

$$Q_b(\tau) = L \cdot E(\tau) \quad (14)$$

bu yerda $L = 2,45 \cdot 10^6 J/kg$ -suvning yashirin bug'lanish issiqligi; $E(\tau)$ -bug'lanish tezligi, $kg/soat$:

$$E(\tau) = e A_{iss} \quad (2.15)$$

bu yerda $A_{iss} = 50 m^2$ -issiqlxona yuzasi; e -bug'langan suv miqdori, $g/(m^2 \cdot soat)$. Hisoblangan parametrlar asosida bug'lanish orqali issiqlik yo'qotilishi quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$Q_b(\tau) = \frac{LeA_{iss}}{1000 \cdot 3600} = 34e \quad (16)$$

Yuqorida aniqlangan (4), (7), (11), (13) va (16) ifodalarni (1) ifodaga quyib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$c_{p,i.h} \rho_{i.h} V_{is} \frac{dt_{i.h}(\tau)}{d\tau} = 32 I_q - [574,16(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) + 56,62 \cdot n_{sh}(\tau)(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) + 11,32(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) + 40(t_{i.h}(\tau) - 12) + 34e] \quad (17)$$

Ushbu (17) ifodadagi o'xshash hadlarni birlashtiramiz va tenglamani standart ko'rinishga keltiramiz:

$$c_{p,i.h} \rho_{i.h} V_{is} \frac{dt_{i.h}}{d\tau} = 32 I_q - (585,48 + 56,62 n_{sh})(t_{i.h}(\tau) - t_{t.h}(\tau)) + 40(t_{i.h}(\tau) - 12) + 34e \quad (18)$$

Vaqt bo'yicha diskretlash uchun orqaga Euler usulini qo'llaymiz:

$$\frac{dt_{i.h}(\tau)}{d\tau} \approx \frac{t_{i.h}^{k+1} - t_{i.h}^k}{\Delta\tau} \\ c_{p,i.h} \rho_{i.h} V_{is} \frac{t_{i.h}^{k+1} - t_{i.h}^k}{\Delta\tau} = 32 I_q^{k+1} - [(585,48 + 56,62 n_{sh}^{k+1})(t_{i.h}^{k+1} - t_{t.h}^{k+1}) + 40(t_{i.h}^{k+1} - 12) + 34e^{k+1}] \quad (19)$$

Tenglamani ochamiz va $t_{i.h}^{k+1}$ hadlarni bir tomonga yig'amiz:

$$\left[\frac{c_{p,i.h} \rho_{i.h} V_{is}}{\Delta\tau} + 585,48 + 56,62 n_{sh}^{k+1} + 40 \right] t_{i.h}^{k+1} = \\ = \frac{c_{p,i.h} \rho_{i.h} V_{is}}{\Delta\tau} t_{i.h}^{k+1} + 32 I_q^{k+1} + (585,48 + 56,62 n_{sh}^{k+1}) t_{t.h}^{k+1} + 480 - 34e^{k+1} \quad (20)$$

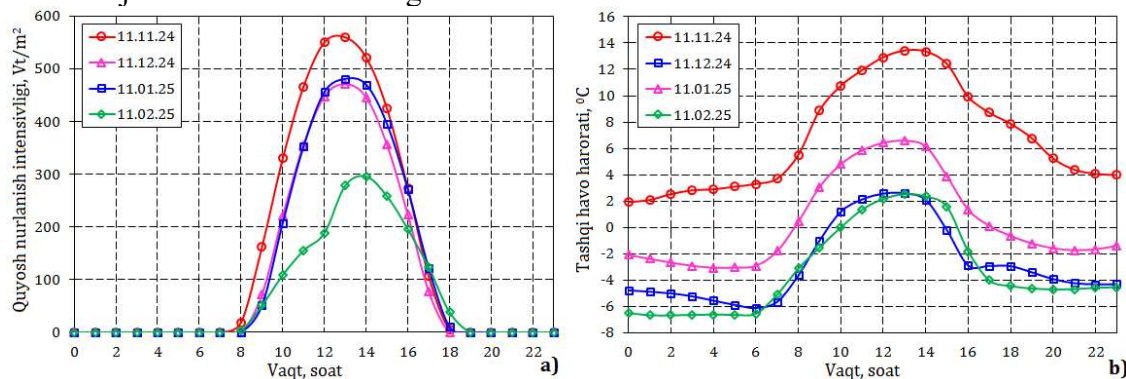
Natijada quyidagi ko'rinishdagi diskret modelga ega bo'lamiz:



$$t_{i,h}^{k+1} = \frac{\frac{c_{p,i,h} \rho_{i,h} V_{is}}{\Delta \tau} t_{i,h}^{k+1} + 32 I_q^{k+1} + (585,48 + 5,62 n_{sh}^{k+1}) t_{t,h}^{k+1} + 480 - 34 e^{k+1}}{\frac{c_{p,i,h} \rho_{i,h} V_{is}}{\Delta \tau} + 625,48 + 5,62 n_{sh}^{k+1}} \quad (21)$$

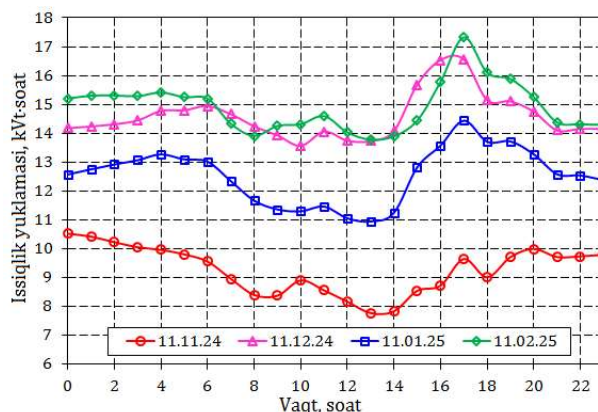
Natijalar va muhokama

Yuqorida keltirilgan (21) ifoda asosida nazariy tadqiqotlarni amalga oshirishdan oldin dastlab gelioissiqxonaning issiqlik yuklamasi aniqlandi. Tadqiqotlarda 2024-yil noyabr oyidan 2025-yil fevral oyigacha bo'lgan isitish mavsumi uchun xarakterli kunlar sifatida har bir oyining 11 sanasi tanlab olindi. Tanlangan sanalar uchun quyosh nurlanish intensivligi va tashqi havo haroratini o'zgarishi natijalari 4-rasmda keltirilgan.



4-rasm. Quyosh nurlanish intensivligi (a) va tashqi havo harorati (b) grafigi.

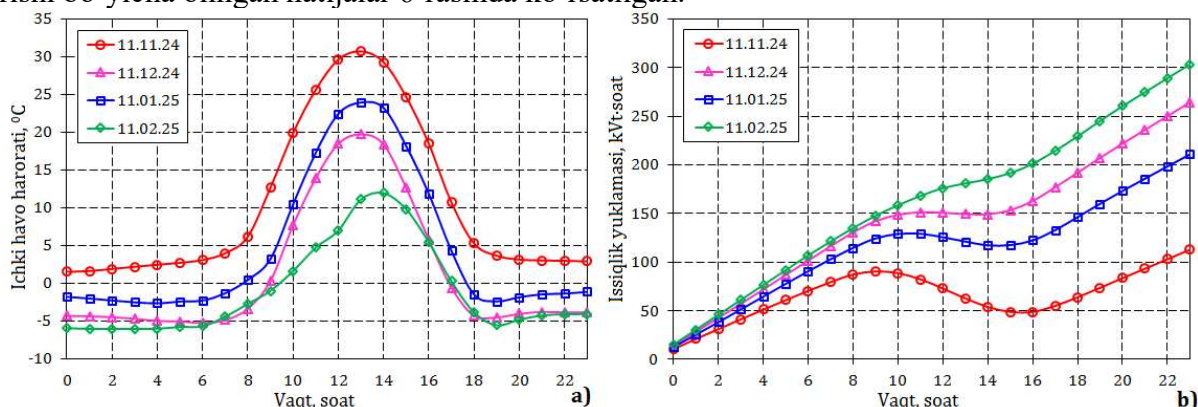
4, a-rasmda quyosh nurlanish intensivligining kun davomida o'zgarishi ko'rsatilgan. Grafikdan ko'rinadiki, barcha xarakterli kunlarda quyosh radiatsiyasi ertalab soat 08:00 dan boshlab asta-sekin ortib boradi va taxminan 12:30-13:30 oralig'ida maksimal qiymatga yetadi. Shundan so'ng esa quyosh balandlik burchagining kamayishi natijasida radiatsiya intensivligi pasaya boshlaydi. 11.11.24 sanasida maksimal nurlanish qiymati taxminan 560,1 Vt/m^2 ni tashkil etib, bu boshqa xarakterli kunlarga nisbatan eng yuqori ko'rsatkich hisoblanadi. 11.12.24 va 11.01.25 kunlarida maksimal qiymatlar mos ravishda taxminan 471,1 Vt/m^2 va 481,3 Vt/m^2 atrofida kuzatildi. Eng past nurlanish intensivligi esa 11.02.25 sanasida qayd etilgan bo'lib, uning maksimal qiymati taxminan 295,7 Vt/m^2 ni tashkil qiladi. Bunday farqlar atmosfera sharoitlari, bulutlilik darajasi va quyosh balandligi burchagining mavsumiy o'zgarishi bilan izohlanadi. 4, b-rasmda tashqi havo haroratining sutkalik o'zgarishi tasvirlangan. Grafikdan ko'rinadiki, barcha xarakterli kunlarda harorat tungi soatlarda minimal qiymatga ega bo'lib, ertalabdan boshlab asta-sekin ortadi va odatda 13:00-14:00 oralig'ida maksimal qiymatga yetadi. Masalan, 11.11.24 sanasida maksimal harorat taxminan 13-14 $^{\circ}C$ atrofida kuzatilgan bo'lsa, 11.01.25 sanasida bu qiymat taxminan 6-7 $^{\circ}C$ ni tashkil etgan. 11.12.24 va 11.02.25 kunlarida esa minimal harorat -4...-5 $^{\circ}C$ gacha pasaygani kuzatildi. Ushbu qiymatlar asosida gelioissiqxonaning sutkalik issiqlik yuklamasini o'zgarishi aniqlandi va natijalar 5-rasmda keltirildi.



5-rasm. Gelioissiqxonaning sutkalik issiqlik yuklamasini o'zgarishi.



Tahlil natijalariga ko'ra, 11.11.2024 sanasida issiqlik yuklamasi minimal qiymatga tushib, 7,8 $kVt \cdot soat$ atrofida bo'ldi. Kechki va tungi soatlarda esa issiqlik yuklamasi maksimal 10,5 $kVt \cdot soat$ gacha ortgan va gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 222,2 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etgan. 11.12.2024 sanasida issiqlik yuklamasi minimal 13,6 $kVt \cdot soat$ gacha va tungi davrda maksimal 16,6 $kVt \cdot soat$ gacha yetgan. Bu holatda gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 349,8 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etadi. 11.01.2025 sanasidagi grafikda issiqlik yuklamasining minimal qiymati 10,9 $kVt \cdot soat$ dan pastga tushmaydi. Kechki va tungi vaqtlarda esa bu ko'rsatkich maksimal 14,4 $kVt \cdot soat$ ga va umumiy issiqlik yuklamasi 301,0 $kVt \cdot soat$ ga yetadi. 11.02.2025 sanasi uchun olingan natijalar qishdan chiqish davriga xos xususiyatlarni aks ettiradi. Bunda issiqlik yuklamasi minimal 13,8 $kVt \cdot soat$ atrofida bo'lib, kechasi bu qiymat 17,3 $kVt \cdot soat$ gacha oshgan va umumiy issiqlik yuklamasi 357,8 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etgan. Ushbu olingan natijalar gelioissiqxonaga quyosh nurlanish intensivligi ta'sir etmagan sharoitda olingan bo'lib, quyosh nurlanish intensivligi ta'sir etganda gelioissiqxona issiqlik yuklamasi va ichki havosi haroratini o'zgarishi bo'yicha olingan natijalar 6-rasmda ko'rsatilgan.



6-rasm. Gelioissiqxona ichki havo harorati (a) va issiqlik yuklamasini (b) sutkalik o'zgarishi natijalari.

6, a-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, 11.11.24 kuni gelioissiqxona ichki harorati 1,5...30,7°C oraliqda o'zgargan va o'rtacha 10,3°C ni tashkil etgan. 11.12.24 kuni gelioissiqxona ichki harorati -5,2...19,7°C oraliqda o'zgargan va o'rtacha 1,3°C ni tashkil etgan. 11.01.25 kuni gelioissiqxona ichki harorati -2,6...23,9°C oraliqda o'zgargan va o'rtacha 4,5°C ni tashkil etgan. 11.02.25 kuni gelioissiqxona ichki harorati -6,0...11,9°C oraliqda o'zgargan va o'rtacha -1,0°C ni tashkil etgan. Ichki harorat ko'rsatkichlariga ko'ra noyabr oyida issiqxona ichida nisbatan yuqori va barqaror harorat kuzatilgan bo'lsa, dekabr va fevral oylarida harorat keskin pasayib, o'rtacha harorat mos ravishda 1,3°C va -1,0°C ni tashkil etgan. Bu esa quyosh energiyasi yetarli bo'lmagan sharoitda issiqlikni saqlab turish qiyinlashishini ko'rsatadi. 6, b-rasmga ko'ra, quyosh nurlanish intensivligi gelioissiqxonaning issiqlik yuklamasiga sezilarli ta'sir ko'rsatgan. 11.11.24 kuni gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 222,2 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etdi, bunda quyosh orqali 109,4 $kVt \cdot soat$ energiya uzatilishi hisobiga 49,2% yuklama qoplangan hamda qo'shimcha isitish tizimi uchun 112,8 $kVt \cdot soat$ qoldiq yuklama mavjud ekanligi aniqlandi. 11.12.24 kuni gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 349,8 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etdi, bunda quyosh orqali 85,4 $kVt \cdot soat$ energiya uzatilishi hisobiga 24,4% yuklama qoplangan hamda qo'shimcha isitish tizimi uchun 264,4 $kVt \cdot soat$ qoldiq yuklama mavjud ekanligi aniqlandi. 11.01.25 kuni gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 301,0 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etdi, bunda quyosh orqali 90,2 $kVt \cdot soat$ energiya uzatilishi hisobiga 30,0% yuklama qoplangan hamda qo'shimcha isitish tizimi uchun 210,9 $kVt \cdot soat$ qoldiq yuklama mavjud ekanligi aniqlandi. 11.02.25 kuni gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi 357,8 $kVt \cdot soat$ ni tashkil etdi, bunda quyosh orqali 54,3 $kVt \cdot soat$ energiya uzatilishi hisobiga 15,2% yuklama qoplangan hamda qo'shimcha isitish tizimi uchun 303,5 $kVt \cdot soat$ qoldiq yuklama mavjud ekanligi aniqlandi. Ushbu natijalar gelioissiqxonalarda quyosh nurlanishining issiqlik ta'minotidagi o'rni muhim ekanligini aniq ko'rsatadi. Tahlillarga ko'ra, kuz faslining nisbatan iliq davrida (11.11.24) quyosh energiyasi issiqlik yuklamasining asosiy qismini



49,2% ini qoplagan va qo'shimcha isitishga ehtiyoj kam bo'lgan. Biroq qish fasliga yaqinlashgan sari quyosh nurlanishi intensivligi kamayib, uning issiqlik yuklamasini qoplash ulushi mos ravishda 15,2% gacha pasaygan. Natijada qo'shimcha isitish tizimiga bo'lgan talab sezilarli darajada ortib, ayniqsa fevral oyida maksimal qiymatga ($303,5 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$) yetgan. Umuman olganda, olingan natijalar gelioissiqxonaning issiqlik rejimi asosan quyosh radiatsiyasi intensivligi va tashqi havo haroratiga bog'liq ekanligini ko'rsatadi. Tungi va ertalabki soatlarda issiqlik yo'qotishlari ustun bo'lsa, kunduzgi davrda quyosh energiyasi hisobiga issiqxona ichida qo'shimcha issiqlik yig'ilishi kuzatiladi. Aniqlangan issiqlik yuklamasi qiymatlari gelioissiqxonani barqaror issiqlik bilan ta'minlaydigan isitish tizimini tanlash va uning ishlash samaradorligini baholash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

Xulosa

1. Tadqiqot natijalariga ko'ra, 11.11.2024 sanasida gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi $222,2 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$ ni tashkil etdi va uning 49,2% qismi quyosh energiyasi hisobiga qoplandi. Bu holatda qo'shimcha isitish tizimiga bo'lgan ehtiyoj $112,8 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$ ni tashkil qilgani aniqlandi. Olingan natijalar kuz mavsumida quyosh energiyasidan samarali foydalanish mumkinligini ko'rsatdi.

2. 11.02.2025 sanasida gelioissiqxonaning umumiy issiqlik yuklamasi $357,8 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$ ga yetib, quyosh energiyasi ulushi atigi 15,2% ni tashkil etdi. Shu sababli qo'shimcha isitish tizimiga bo'lgan talab $303,5 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$ gacha oshgani kuzatildi. Bu esa qish mavsumida issiqlik nasosi va qo'shimcha isitish tizimining ahamiyati yuqori ekanligini tasdiqlaydi.

3. Gelioissiqxona ichki havosi harorati mavsumiy sharoitlarga bog'liq ravishda $-6,0^{\circ}\text{C}$ dan $30,7^{\circ}\text{C}$ gacha o'zgargani aniqlandi. Noyabr oyida o'rtacha ichki harorat $10,3^{\circ}\text{C}$ ni tashkil etgan bo'lsa, fevral oyida bu ko'rsatkich $-1,0^{\circ}\text{C}$ gacha pasaygan. Natijalar tashqi havo harorati va quyosh radiatsiyasi intensivligi issiqxona mikroiklimiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi.

4. Tadqiqotlarda issiqxona konstruksiyasi orqali issiqlik yo'qotilishi $574,16(\text{ti.h}-\text{tt.h})$ ko'rinishidagi tenglama orqali ifodalandi. Shamollatish orqali issiqlik yo'qotilishi esa shamollatish intensivligiga bog'liq ravishda $56,62 \cdot \text{nsh}(\text{ti.h}-\text{tt.h})$ formula asosida hisoblandi. Ushbu matematik model issiqlik yo'qotilishlarini aniq baholash va energiya sarfini optimallashtirish imkonini berdi.

5. Gelioissiqxonaning foydali maydoni 50 m^2 va umumiy hajmi $168,3 \text{ m}^3$ deb qabul qilinib, issiqlik rejimi dinamik model asosida tadqiq qilindi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, kunduzgi vaqtda quyosh energiyasi hisobiga qo'shimcha issiqlik yig'ilishi kuzatilgan bo'lsa, tungi davrda issiqlik yo'qotilishlari ustunlik qildi. Bu holat kombinatsiyalashgan isitish tizimi yordamida issiqxona ichida barqaror mikroiklim rejimini shakllantirish mumkinligini ko'rsatadi.

Adabiyotlar

- [1]. Safarov A.B., Raxmatov O.I. Assessment of the technical and economic efficiency of autonomous solar greenhouses with even-span structures // *Alternative Energy*. – 2024. – Vol. 3, No. 14. – Pp. 9–16.
- [2]. Davlonov Kh., Toshboev A., Sultanov S. The main heat-technical parameters of solar greenhouses in the southern climate of Uzbekistan // *APEC-VI-2023. E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 411. – Article 01038.
- [3]. Вардияшвили А.А. Расчет энергосбережения при применении теплонасосной установки в гелиотеплицах // *Альтернативная энергетика*. – 2022. – № 4 (07). – С. 18–22.
- [4]. Fatillayev S.Z., Ergashev Sh.H., Uzoqov G'.N. Zamonaviy gelioissiqxonalarining statsionar rejimda issiqlik-energetik parametrlarini hisoblash natijalari // *Innovatsion texnologiyalar*. – 2023. – Vol. 52. – No. 4. – Pp. 22–27.
- [5]. Abir Ahsan T.M., Shamim Ahamed M., Hassan A.A. Hybrid ground source heat pump for sustainable greenhouse climate control in hot and humid region // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2025. – Vol. 83. – Article 104615. – DOI: 10.1016/j.seta.2025.104615.
- [6]. Zhou B. et al. Smart energy supply for smart farms: A hybrid ground source heat pump in seasonal greenhouses for growing cherries // *Smart Agricultural Technology*. – 2026. – Vol. 13. – Article 101709. – DOI: 10.1016/j.atech.2025.101709.