

Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlarini matematik modellash

Gulom N. Uzakov^{1a}, Sardor I. Xamrayev^{1b}

^{1a}) DSc, prof., Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O'zbekiston; uzoqov66@mail.ru <https://orcid.org/0009-0005-7386-8075>

^{1b}) PhD, dotsent., Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O'zbekiston xamrayevs@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-0847-9488>

Dolzarbli: hozirgi Respublikamizda kunda binolarning energiya samaradorligini oshirish va yoqilg'i-energiya resurslaridan oqilona foydalanish masalasi energetika va qurilish sohasining ustuvor yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Statistik ma'lumotlarga ko'ra, turar joy va jamoat binolarida umumiy energiya iste'molining 40 % ga isitish tizimlariga to'g'ri keladi. Shu sababli, past haroratli va energiya tejankor isitish texnologiyalarini joriy etish energiya va resurs tejash muammolarini hal etishda muhim ahamiyat kasb etadi. Ma'lumki, gidronik issiq pol tizimlari yuqori issiqlik komforti, harorat maydonining bir tekis taqsimlanishi hamda past haroratli issiqlik tashuvchilar bilan ishlash imkoniyati bilan ajralib turadi. Biroq ushbu tizimlarning samarali ishlashi undagi issiqlik almashinuv jarayonlarini faollashtirish masalasini yechish talab etadi chunki issiqlik tashuvchidan quvur devoriga, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali pol yuzasiga va xona havosiga issiqlik uzatilishining murakkab mexanizmlari energiya samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu bois gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlarini matematik modellash va ularning energiya samaradorligiga ta'sirini baholash dolzarb ilmiy-amaliy masala hisoblanadi.

Maqsad: mazkur tadqiqotning maqsadi gidronik issiq pol tizimida yuz beradigan issiqlik almashinuv jarayonlarini matematik modellash asosida tahlil qilish, issiqlik tashuvchining harorati, quvur oralig'i va pol konstruksiyasining issiqlik-texnik xususiyatlarining issiqlik oqimi va energiya samaradorligiga ta'sirini aniqlash hamda energiya va resurs tejash nuqtayi nazaridan optimal ish rejimlarini asoslashdan iborat.

Usullar: tadqiqot jarayonida gidronik issiq pol tizimining issiqlik almashinuv jarayonlarini tahlil qilish uchun issiqlik balansi, issiqlik o'tkazuvchanlik (Furye qonuni), konvektiv va nurlanish issiqlik almashinuvi tenglamalariga asoslangan matematik modellash usullari qo'llanildi. Issiqlik tashuvchining quvur ichidagi oqimi, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik uzatilishi hamda pol yuzasidan xona havosiga issiqlik berilishi ketma-ket bosqichlar asosida modellashirildi. Hisobiy-tahliliy usullar yordamida tizimning turli ekspluatatsion rejimlari uchun issiqlik oqimlari va energiya samaradorligi ko'rsatkichlari baholandi.

Natijalar: matematik modellash asosida gidronik issiq pol tizimining issiqlik berish quvvati va energiya samaradorligi ko'rsatkichlari tahlil qilindi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, issiqlik tashuvchining harorati va quvur oralig'ining issiqlik oqimiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini aniqladi. Past haroratli ish rejimlarida ham yetarli issiqlik berish quvvatiga erishish mumkinligi ko'rsatildi hamda energiya samaradorligi yuqori bo'lgan ish rejimlari asoslab berildi. Olingan natijalar gidronik issiq pol tizimlarini energiya tejankor isitish texnologiyasi sifatida qo'llashning samaradorligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: gidronik issiq pol tizimi, issiqlik almashinuvi, matematik model, issiqlik oqimi, energiya samaradorligi, energiya va resurs tejash.

For citation: Uzakov G.N., Xamrayev S.I. Mathematical modeling of heat transfer processes in a hydronic radiant floor heating system. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 23-34.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21156335>

Received: 14.12.2025

Revised: 16.04.2026

Accepted: 04.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Gulom N. Uzakov, Sardor I. Xamrayev, 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/>).

Математическое моделирование процессов теплообмена в гидронической системе тёплого пола

Гуллом Н. Узаков^{1a}, Сардор И. Хамраев^{1b}

^{1a}) DSc, проф., Каршинский государственный технический университет, Карши, 180100, Республика Узбекистан; uzoqov66@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-7386-8075>

^{1b}) PhD, доцент, Каршинский государственный технический университет, Карши, 180100, Республика Узбекистан; xamrayevs@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0847-9488>

Актуальность: в настоящее время повышение энергетической эффективности зданий и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов являются приоритетными направлениями в энергетической и строительной отраслях республики. Согласно статистическим данным, около 40% общего энергопотребления жилых и общественных зданий приходится на системы отопления. В связи с этим внедрение низкотемпературных и энергоэффективных технологий отопления имеет важное значение для решения задач энергосбережения и ресурсосбережения. Гидронические системы тёплого пола характеризуются высоким уровнем теплового комфорта, равномерным распределением температурного поля и возможностью работы с низкотемпературными теплоносителями. Однако эффективная работа данных систем требует интенсификации процессов теплообмена, поскольку сложные механизмы передачи тепла от теплоносителя к стенке трубы, далее через слои конструкции пола к поверхности пола и воздуху помещения непосредственно влияют на энергетическую эффективность. В связи с этим математическое моделирование процессов теплообмена в гидронических системах тёплого пола и оценка их влияния на энергетическую эффективность являются актуальной научно-практической задачей.

Цель: целью настоящего исследования является анализ процессов теплообмена в гидронической системе тёплого пола на основе математического моделирования, определение влияния температуры теплоносителя, шага укладки труб и теплофизических характеристик конструкции пола на тепловой поток и энергетическую эффективность, а также обоснование оптимальных режимов работы с точки зрения энергосбережения и ресурсосбережения.

Методы: в ходе исследования для анализа процессов теплообмена в гидронической системе тёплого пола применялись методы математического моделирования, основанные на уравнениях теплового баланса, теплопроводности (закон Фурье), конвективного и лучистого теплообмена. Течение теплоносителя внутри трубы, передача тепла через слои конструкции пола и отдача тепла с поверхности пола воздуху помещения моделировались в виде последовательных этапов. С использованием расчётно-аналитических методов были оценены тепловые потоки и показатели энергетической эффективности для различных эксплуатационных режимов системы.

Результаты: на основе математического моделирования были проанализированы тепловая мощность и показатели энергетической эффективности гидронической системы тёплого пола. Результаты расчётов показали, что температура теплоносителя и шаг укладки труб оказывают существенное влияние на величину теплового потока. Показано, что даже при низкотемпературных режимах работы возможно достижение достаточной тепловой мощности, а также обоснованы режимы с высокой энергетической эффективностью. Полученные результаты подтверждают эффективность применения гидронических систем тёплого пола в качестве энергосберегающей технологии отопления.

Ключевые слова: гидроническая система тёплого пола, теплообмен, математическая модель, тепловой поток, энергетическая эффективность, энергосбережение и ресурсосбережение.

Mathematical modeling of heat transfer processes in a hydronic radiant floor heating system

Gulom N. Uzakov^{1a}, Sardor I. Khamraev¹

^{1a}) DSc, Professor, Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Republic of Uzbekistan; uzoqov66@mail.ru <https://orcid.org/0009-0005-7386-8075>

¹) PhD, Associate Professor, Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Republic of Uzbekistan; xamrayevs@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-0847-9488>

Relevance: at present, increasing the energy efficiency of buildings and the rational use of fuel and energy resources are among the priority directions of the energy and construction sectors in the Republic. According to statistical data, about 40% of total energy consumption in residential and public buildings is attributed to heating systems. Therefore, the implementation of low-temperature and energy-efficient heating technologies plays an important role in solving energy and resource-saving problems. Hydronic radiant floor heating systems are characterized by high thermal comfort, uniform temperature distribution, and the ability to operate with low-temperature heat carriers. However, the efficient operation of such systems requires intensification of heat transfer processes, since the complex mechanisms of heat transfer from the heat carrier to the pipe wall, through the floor structure layers to the floor surface and indoor air directly affect energy efficiency. Therefore, mathematical modeling of heat transfer processes in hydronic radiant floor heating systems and evaluation of their impact on energy efficiency represent a relevant scientific and practical problem.

Aim: the aim of this study is to analyze heat transfer processes occurring in a hydronic radiant floor heating system based on mathematical modeling, to determine the influence of heat carrier temperature, pipe spacing, and thermal properties of the floor structure on heat flux and energy efficiency, and to substantiate optimal operating modes from the viewpoint of energy and resource conservation.

Methods: in the study, mathematical modeling methods based on heat balance equations, heat conduction (Fourier's law), convective and radiative heat transfer equations were applied to analyze heat transfer processes in the hydronic radiant floor heating system. The flow of the heat carrier inside the pipe, heat transfer through the layers of the floor structure, and heat release from the floor surface to the indoor air were modeled as sequential stages. Using computational and analytical methods, heat fluxes and energy efficiency indicators were evaluated for various operating modes of the system.

Results: based on mathematical modeling, the heat output capacity and energy efficiency indicators of the hydronic radiant floor heating system were analyzed. The calculation results showed that the heat carrier temperature and pipe spacing have a significant influence on heat flux. It was demonstrated that sufficient heat output can be achieved even under low-temperature operating modes, and energy-efficient operating regimes were substantiated. The obtained results confirm the effectiveness of hydronic radiant floor heating systems as an energy-efficient heating technology.

Keywords: hydronic radiant floor heating system, heat transfer, mathematical model, heat flux, energy efficiency, energy and resource saving.

1. Kirish (Introduction)

Binolarning energiya iste'molini kamaytirish va energiya resurslaridan samarali foydalanish masalasi hozirgi kunda dolzarb ilmiy-texnik muammolardan biri hisoblanadi. Jahonda energiya resurslarining cheklanganligi, yoqilg'i narxlarining ortib borishi hamda atrof-muhitga bo'lgan antropogen ta'sir-

ing kuchayishi energiya tejankor texnologiyalarni joriy etishni taqozo etmoqda. Statistik ma'lumotlarga ko'ra, uy-joy va jamoat binolarida umumiy energiya sarfining katta qismi isitish tizimlariga to'g'ri keladi, bu esa binolarni isitish jarayonida energiya samaradorligini oshirish masalasini ustuvor yo'nalish sifatida belgilaydi. Shu sababli energiya tejankor isitish texnologiyalarini ishlab chiqish va amaliyotga joriy etish energiya va resurs tejash muammolarini hal etishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Jumladan, gidronik issiq pol tizimlari past haroratli isitish texnologiyalari sirasiga kirib, yuqori issiqlik komfortini ta'minlashi, harorat maydonining xona bo'ylab bir tekis taqsimlanishi hamda inson salomatligi uchun qulay mikroiklim yaratishi bilan ajralib turadi. Ushbu tizimlarda issiqlik tashuvchining nisbatan past haroratlarda ishlashi issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish bilan birga, past haroratli issiqlik manbalari bilan samarali integratsiyalashuv imkonini beradi va natijada umumiy energiya samaradorligini oshiradi.

Biroq gidronik issiq pol tizimlarining samarali va barqaror ishlashi undagi issiqlik almashinuv jarayonlarini chuqur tadqiq qilish, issiqlik oqimlarining shakllanish mexanizmlarini aniqlash muhim hisoblanadi. Shu nuqtayi nazardan, gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlarining matematik modellashirilishi tizimning issiqlik-energetik ko'rsatkichlarini baholash, optimal konstruktiv va ekspluatatsion rejimlarni aniqlash hamda energiya resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi. Mazkur ilmiy maqolada gidronik issiq pol tizimida yuz beradigan issiqlik almashinuv jarayonlari matematik modellashirish, olingan natijalarning energiya tejankor isitish tizimlarini rivojlantirishdagi ahamiyati yoritilgan [1-2].

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Tadqiqot obyekti sifatida quvvurli gidronik issiq pol tizimi qabul qilindi. Mazkur tizim binolarni past haroratli isitish texnologiyalari asosida issiqlik bilan ta'minlashga mo'ljallangan bo'lib, issiqlik energiyasining pol konstruksiyasi orqali xona havosiga uzatilishini ta'minlaydi. Gidronik issiq pol tizimi ko'p komponentli termodinamik tizim sifatida qaralib, unda issiqlik almashinuv jarayonlari bir necha ketma-ket bosqichlarda amalga oshadi.

Tizimning asosiy tarkibiy elementlari quyidagilardan iborat: issiqlik tashuvchi suyuqlik sifatida suv, pol konstruksiyasiga joylashtirilgan quvvur konturi, issiqlikni akkumulyatsiyalovchi va tarqatuvchi beton (yoki boshqa issiqlik o'tkazuvchi) qatlam, shuningdek, pol yuzasi va xona havosi. Ushbu elementlar o'rtasidagi issiqlik almashinuv jarayonlari tizimning umumiy issiqlik berish quvvati va energiya samaradorligini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi.

Tadqiqotda issiqlik almashinuv jarayonlarini tahlil qilish uchun matematik modellashirishga asoslangan hisobiy-tahliliy yondashuv qo'llanildi. Xususan, issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga issiqlik uzatilishi konvektiv issiqlik almashinuvni tenglamalari yordamida tavsiflandi. Pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlikning tarqalishi qatlamli muhitda issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamalari asosida modellashirildi. Pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi esa konvektiv va nurlanish jarayonlarini hisobga olgan holda ifodalandi.

Shuningdek, issiqlik balansi tenglamalari tuzildi va issiqlik oqimlarining o'zaro bog'liqligi tahlil qilindi. Tadqiqot metodologiyasi tizimning asosiy geometrik va issiqlik-texnik parametrlarining issiqlik berish quvvatiga ta'sirini aniqlashga hamda gidronik issiq pol tizimlarining energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan optimal ish rejimlarini belgilashga imkon beradi.

Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuvining matematik modeli. Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlari ketma-ket va o'zaro bog'liq bosqichlarda amalga oshadi. Issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga, undan pol konstruksiyasi qatlamlari orqali pol yuzasiga hamda yakuniy bosqichda xona havosiga issiqlik uzatiladi. Ushbu jarayonlarni matematik jihatdan to'g'ri ifodalash tizimning issiqlik berish quvvatini aniqlash, issiqlik yo'qotishlarini baholash va energiya samaradorligini oshirish imkonini beradi.

2.1. Issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga issiqlik uzatilishi. Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonining boshlang'ich va hal qiluvchi bosqichi issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga issiqlik uzatilishidir. Issiqlik tashuvchi suyuqlik quvvur ichida majburiy konveksiya rejimida oqib, o'zining ichki energiyasining ma'lum qismini quvvur devori orqali atrofda pol konstruksiyasiga uzatadi. Mazkur jarayon keyingi bosqichlardagi issiqlik o'tkazish intensivligini belgilab, tizimning umumiy issiqlik berish quvvati va energiya samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi [3-4].

Issiqlik tashuvchining quvvur ichida oqishi jarayonida uzatiladigan issiqlik miqdori energiya balansi asosida quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$Q_1 = \dot{m}c_p(t_{in} - t_{out}); \quad (1)$$

bu yerda: $\dot{m}$ - issiqlik tashuvchining massaviy sarfi, kg/s ; c_p - issiqlik tashuvchining solishtirma issiqlik sig'imi, $J/(kg \cdot K)$; t_{in}, t_{out} - quvvurga kirish va chiqish haroratlari, $^{\circ}C$.

(1)-tenglama issiqlik tashuvchidan quvvur devori orqali atrof muhitga (pol konstruksiyasiga) uzatila-yotgan umumiy issiqlik oqimini aniqlash imkonini beradi. Biroq issiqlik berish jarayonining intensivligini chuqurroq tahlil qilish uchun konvektiv issiqlik berish koeffitsiyentini aniqlash zarur bo'ladi.



Quvur ichidagi konvektiv issiqlik berish jarayoni o'lhamsiz Nusselt soni orqali ifodalanadi:

$$Nu = \frac{hd}{\lambda}; \quad (2)$$

bu yerda: h - quvur ichki yuzasidagi konvektiv issiqlik berish koeffitsiyenti, $W/(m^2 \cdot K)$; d - quvurning ichki diametri, m ; λ - issiqlik tashuvchining issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $W/(m \cdot K)$.

Nusselt soni oqim rejimiga bog'liq bo'lib, quvur ichidagi laminar va turbulent oqimlar uchun turli empirik bog'lanishlar orqali aniqlanadi. Amaliy isitish tizimlarida ko'pincha turbulent oqim rejimi kuzatiladi va bu holatda Nusselt soni Reynolds va Prandtl sonlari orqali quyidagi umumiy ifoda bilan aniqlanishi mumkin:

$$Nu = C Re^m Pr^n; \quad (3)$$

bu yerda: Re - Reynolds soni; Pr - Prandtl soni; C, m, n - oqim sharoitiga bog'liq empirik koeffitsiyentlar.

Nusselt sonining ortishi quvur ichki yuzasi bilan issiqlik tashuvchi o'rtasidagi konvektiv issiqlik berish koeffitsiyentining ortishini anglatadi, bu esa bir xil haroratlar farqida issiqlik oqimi zichligining ortishiga olib keladi. Natijada issiqlik tashuvchidan quvur devori orqali pol konstruksiyasiga uzatiladigan issiqlik miqdori ortadi. Shu bilan birga, oqim tezligining ortishi Reynolds sonining oshishiga olib kelib, gidravlik qarshilik va bosim yo'qotishlarini sezilarli darajada kuchaytiradi, bu esa aylanish nasosining elektr energiyasi sarfining ortishiga sabab bo'ladi. Demak, gidronik issiq pol tizimlarida issiqlik almashinuvi intensivligini oshirish va nasos energiya sarfini cheklash o'rtasida optimal muvozanatni ta'minlash tizimning umumiy energetik samaradorligini oshirish nuqtayi nazaridan muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Shu tariqa, issiqlik tashuvchidan quvur devoriga konvektiv issiqlik uzatilishini Nusselt soni orqali ifodalash quvur ichidagi issiqlik almashinuvi intensivligini miqdoriy baholash imkonini beradi. Mazkur yondashuv gidronik issiq pol tizimlarida issiqlik almashinuv jarayonlarini matematik modellashirishni aniqlashtirish, oqim rejimlarini (laminar yoki turbulent) asosli tanlash hamda issiqlik berish samaradorligi va gidravlik yo'qotishlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni kompleks tahlil qilish uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.

Issiqlik tashuvchidan quvur devoriga berilgan issiqlik miqdori aniqlangandan keyin issiqlikning pol konstruksiyasi qatlamlari orqali qanday tarqalishini baholash zarur bo'ladi. Chunki quvur devoridan berilgan issiqlikning samarali tarzda pol yuzasiga yetib borishi tizimning umumiy issiqlik berish quvvatini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi. Shu bois keyingi bosqichda quvur devoridan pol yuzasiga issiqlikning o'tkazilishi jarayoni qatlamli muhitda issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamalari asosida ko'rib chiqiladi.

2.2. Pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik o'tkazilishi. Quvur devoridan pol yuzasiga issiqlik uzatilishi gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv zanjirining muhim bosqichlaridan biri hisoblanadi. Mazkur jarayonda issiqlik quvur devoridan pol konstruksiyasining qattiq qatlamlari (beton yoki boshqa issiqlik o'tkazuvchi materiallar) orqali asosan issiqlik o'tkazuvchanlik (konduksiya) mexanizmi bilan tarqaladi. Pol konstruksiyasining qatlamli tuzilishi va materiallarning issiqlik-fizik xossalari (issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, zichlik, issiqlik sig'imi) issiqlik oqimining taqsimlanishi va vaqt bo'yicha o'zgarish xarakterini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi. Shu sababli ushbu parametrlar tizimning issiqlik inertsia xususiyatlari va umumiy energiya samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi[5].

Pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik o'tkazilishi Fyurje qonuniga muvofiq quyidagi umumiy ko'rinishda ifodalanadi:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}; \quad (4)$$

bu yerda: q - birlik yuzaga to'g'ri keladigan issiqlik oqimi zichligi, W/m^2 ; λ - materialning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $W/(m \cdot K)$; $\frac{dT}{dx}$ - harorat gradiyenti.

Qatlamli muhit uchun issiqlik oqimi pol konstruksiyasining barcha qatlamlarini hisobga olgan holda ekvivalent issiqlik qarshiligi tushunchasi orqali qulay ifodalanadi. Bu holda quvur devori va pol yuzasi o'rtasidagi issiqlik oqimi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Q_2 = \frac{t_f - t_s}{R_{eq}}; \quad (5)$$

bu yerda: t_f - issiqlik tashuvchining o'rtacha harorati, $^{\circ}C$; t_s - pol yuzasining harorati, $^{\circ}C$; R_{eq} - pol konstruksiyasining ekvivalent issiqlik qarshiligi, $(m^2 \cdot K)/W$.

Qatlamli pol konstruksiyasi uchun ekvivalent issiqlik qarshiligi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \quad (6)$$

bu yerda: δ_i - i -qatlamning qalinligi, m ; λ_i - i -qatlamning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $W/(m \cdot K)$; n - pol konstruksiyasidagi qatlamlar soni.

(6)-ifodadan ko'rinib turibdiki, pol konstruksiyasida yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega materiallardan foydalanish yoki issiqlik o'tkazuvchi qatlam qalinligini optimallashtirish ekvivalent issiqlik

qarshiligini kamaytirib, pol yuzasiga uzatiladigan issiqlik oqimini oshiradi. Shu bilan birga, pastki qatlamlarda issiqlik izolyatsiyasining mavjudligi issiqlik yo'qotishlarini cheklash va foydali issiqlik oqimini oshirish imkonini beradi.

Shu tariqa, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik o'tkazilishini Furry tenglamasi va ekvivalent issiqlik qarshiligi tushunchasi asosida modellashtirish gidronik issiq pol tizimlarida issiqlik tarqalishini chuqur tahlil qilish, konstruktiv parametrlarni optimallashtirish va tizimning umumiy energiya samaradorligini oshirish uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlikning o'tkazilishi tahlil qilingandan so'ng, ushbu issiqlikning pol yuzasidan xona havosiga qanday uzatilishini baholash muhim ahamiyat kasb etadi. Chunki pol yuzasi bilan xona havosi o'rtasidagi issiqlik almashinuv jarayoni tizimning foydali issiqlik berish quvvatini bevosita belgilaydi hamda binoda shakllanadigan issiqlik komfortiga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli keyingi bosqichda pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi konvektiv va nurlanish jarayonlarini hisobga olgan holda ko'rib chiqiladi.

2.3. Pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi. Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonining yakuniy bosqichi pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi bilan tavsiflanadi. Ushbu bosqich tizimning foydali issiqlik berish quvvatini bevosita belgilaydi va binoda shakllanadigan issiqlik komfortining asosiy omili hisoblanadi. Pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi asosan ikki mexanizm - konvektiv va nurlanish issiqlik almashinuvi orqali amalga oshadi [6].

Konvektiv issiqlik uzatilishi. Pol yuzasi bilan xona havosi o'rtasidagi konvektiv issiqlik almashinuv jarayoni quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$Q_{conv} = h_c A (t_s - t_{air}); \quad (7)$$

bu yerda: h_c - konvektiv issiqlik berish koeffitsiyenti, $W/(m^2 \cdot K)$; A - pol yuzasi maydoni, m^2 ; t_s - pol yuzasining harorati, $^{\circ}C$; t_{air} - xona havosining o'rtacha harorati, $^{\circ}C$.

Konvektiv issiqlik berish koeffitsiyenti xona ichidagi havo harakati intensivligi, pol yuzasining geometrik va fizik xossalari hamda haroratlar farqiga bog'liq bo'lib, tabiiy konveksiya sharoitida nisbatan kichik qiymatlarga ega bo'ladi. Issiq pol tizimlarida aynan tabiiy konveksiya ustun bo'lib, bu holat harorat maydonining bir tekis taqsimlanishini va qulay mikroiklim shakllanishini ta'minlaydi.

Nurlanish orqali issiqlik uzatilishi. Pol yuzasidan xona ichidagi atrof-muhit elementlariga nurlanish orqali uzatiladigan issiqlik oqimi Stefan-Boltsman qonuni asosida quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4); \quad (8)$$

bu yerda: ε - pol yuzasining nurlanish qobiliyati (emissivlik); σ - Stefan-Boltsman doimiysi, $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T_{sur} - xona ichidagi atrof-muhit sirtlarining o'rtacha mutlaq harorati, K .

Nurlanish issiqlik almashinuvining mavjudligi issiq pol tizimlarida issiqlik komfortining yuqori darajada sezilishiga olib keladi, chunki inson tanasi atrofidagi sirtlar bilan nurlanish orqali bevosita issiqlik almashinuvida bo'ladi. Past haroratli issiq pol tizimlarida nurlanish ulushi sezilarli bo'lib, bu holat konvektiv havo harakatlarini kamaytirish va chang aylanishini cheklash imkonini beradi [7-8].

Umumiy issiqlik uzatilishi. Pol yuzasidan xona havosiga uzatiladigan umumiy issiqlik oqimi konvektiv va nurlanish komponentlarining yig'indisi sifatida aniqlanadi:

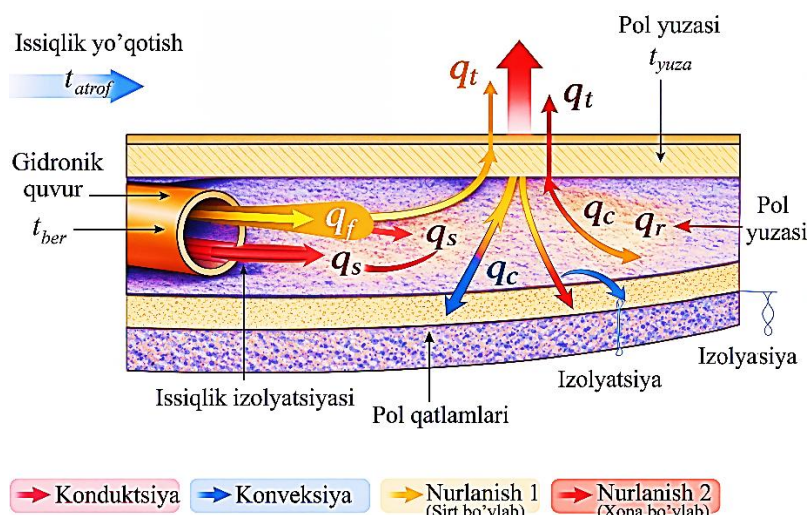
$$Q_3 = Q_{conv} + Q_{rad}; \quad (9)$$

(9)-ifoda gidronik issiq pol tizimida foydali issiqlik berish quvvatini to'liq tavsiflaydi va tizimning energiya samaradorligini baholashda asosiy hisobiy bog'lanishlardan biri hisoblanadi. Konvektiv va nurlanish issiqlik almashinuvining birgalikda hisobga olinishi issiq pol tizimlarida issiqlik komfortini yuqori darajada ta'minlash va energiya sarfini kamaytirish imkonini beradi.

Shu tariqa, pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishini konveksiya va nurlanish mexanizmlarini birgalikda hisobga olgan holda modellashtirish gidronik issiq pol tizimlarining foydali issiqlik berish quvvatini aniq baholash, energiya samaradorligini oshirish va qulay mikroiklim yaratish uchun muhim ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlari ketma-ket va o'zaro bog'liq bosqichlarda amalga oshib, issiqlik tashuvchidan xona havosiga energiya uzatilishi bir necha issiqlik oqimlari orqali ifodalanadi. Ushbu jarayonlarning fizik mazmuni va energiya oqimlarining yo'nalishi 1-rasmda sxematik ko'rinishda keltirilgan.

1-rasmda gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlarining shakllanishi va uzatilish mexanizmlari tasvirlangan. Issiqlik tashuvchining quvur ichidagi harakati natijasida hosil bo'ladigan issiqlik oqimi (q_f, q_s) avvalo quvur devori orqali pol konstruksiyasi qatlamlariga konduktiv yo'l bilan uzatiladi. Keyingi bosqichda issiqlik oqimlari pol konstruksiyasi ichida issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga taqsimlanib, pol yuzasiga yetib boradi. Pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi konvektiv (q_c) va nurlanish (q_r) mexanizmlari orqali amalga oshadi hamda foydali issiqlik oqimi (q_t) sifatida namoyon bo'ladi. Shu bilan birga, issiqlik oqimining bir qismi pastki qatlamlar orqali issiqlik izolyatsiyasi va grunt tomonga yo'naltirilgan yo'qotishlar ko'rinishida sarflanadi. Mazkur sxema gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlarining murakkab va ko'p bosqichli xarakterini ifodalaydi hamda tizimning energiya samaradorligini baholash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.



1-rasm. Gidronik issiq pol tizimida issiqlik oqimlarining shakllanishi va uzatilish sxemasi

Fig. 1. Formation and transfer scheme of heat fluxes in a hydronic radiant floor heating system

Pol yuzasidan xona havosiga uzatiladigan foydali issiqlik oqimi aniqlangandan so'ng, gidronik issiq pol tizimining umumiy energetik holatini baholash zarurati yuzaga keladi. Chunki tizimning energiya samaradorligi faqat foydali issiqlik uzatilishi bilan emas, balki tizimga kiritiladigan umumiy issiqlik energiyasi va undagi yo'qotishlar o'rtasidagi nisbat bilan belgilanadi. Shu sababli keyingi bosqichda gidronik issiq pol tizimi uchun umumiy energiya balansi tuzilib, foydali issiqlik oqimi va issiqlik yo'qotishlarining o'zaro bog'liqligi tahlil qilinadi.

2.4. Gidronik issiq pol tizimining umumiy energiya balansi va issiqlik yo'qotishlari. Gidronik issiq pol tizimining energiya samaradorligini to'liq baholash uchun undagi issiqlik almashinuv jarayonlarini alohida bosqichlar bo'yicha emas, balki umumiy energiya balansi asosida tahlil qilish zarur. Tizimga kiritiladigan issiqlik energiyasi issiqlik tashuvchidan quvur devori orqali pol konstruksiyasiga uzatiladi va undan ma'lum qismi foydali issiqlik sifatida xona havosiga beriladi, qolgan qismi esa turli yo'qotishlar ko'rinishida sarflanadi.

Gidronik issiq pol tizimi uchun umumiy energiya balansi quyidagi ko'rinishda ifodalanishi mumkin:

$$Q_{in} = Q_3 + Q_{loss}; \quad (10)$$

bu yerda: Q_{in} - issiqlik tashuvchidan tizimga kiritiladigan umumiy issiqlik oqimi, W ; Q_3 - pol yuzasidan xona havosiga uzatiladigan foydali issiqlik oqimi, W ; Q_{loss} - tizimdagi umumiy issiqlik yo'qotishlari, W .

Issiqlik tashuvchidan tizimga kiritiladigan issiqlik miqdori 3.1-bandda keltirilgan ifodaga muvofiq aniqlanadi va quyidagicha yozilishi mumkin:

$$Q_{in} = Q_1 = m \cdot c_p (t_{in} - t_{out}). \quad (11)$$

Issiqlik yo'qotishlari asosan pol konstruksiyasining pastki qismi orqali binoning konstruktiv elementlariga uzatiladigan issiqlik, quvurlar orqali atrof-muhitga tarqaladigan issiqlik hamda boshqaruv va notekis ish rejimlari bilan bog'liq qo'shimcha yo'qotishlardan iborat bo'ladi. Umumiy holda issiqlik yo'qotishlarini quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$Q_{loss} = Q_{down} + Q_{pipe} + Q_{add}; \quad (12)$$

bu yerda: Q_{down} - pol konstruksiyasining pastki qatlamlari orqali issiqlik yo'qotilishi, W ; Q_{pipe} - quvurlar orqali issiqlik yo'qotilishi, W ; Q_{add} - ekspluatatsion va notekis ish rejimlari bilan bog'liq qo'shimcha yo'qotishlar, W .

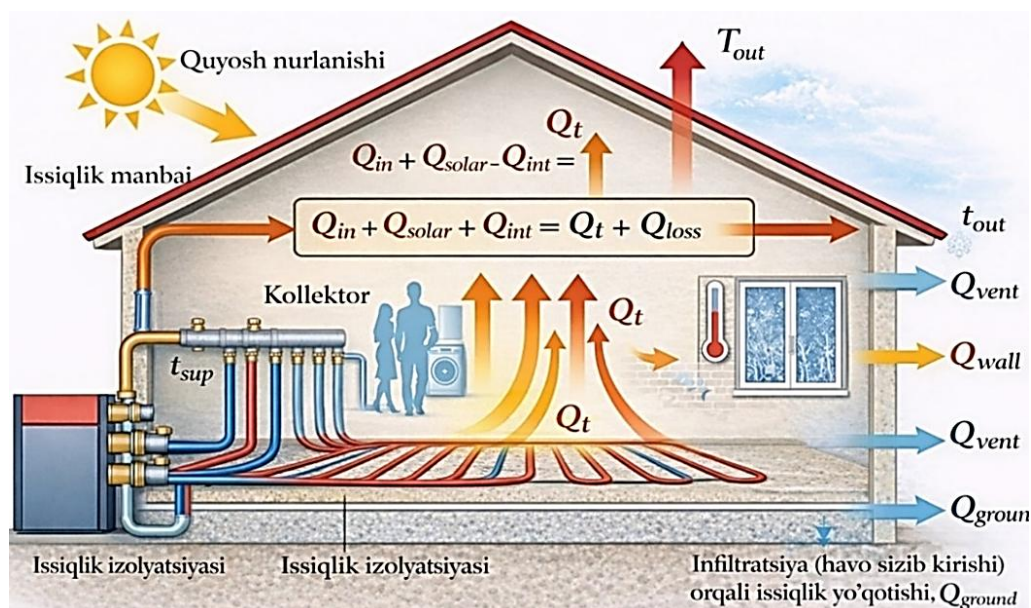
Issiqlik yo'qotishlari miqdori pol osti issiqlik izolyatsiyasining materiali, materialning issiqlik o'tkazuvchanligi hamda quvur joylashuvi kabi omillarga sezilarli darajada bog'liqdir. Shu sababli, energiya balansini tahlil qilish orqali tizimda foydali ishlatilmayotgan issiqlik ulushini aniqlash va uni kamaytirishga qaratilgan konstruktiv yechimlarni ishlab chiqish mumkin [9].

Gidronik issiq pol tizimining umumiy energiya samaradorligi foydali issiqlik oqimining tizimga kiritilgan issiqlik energiyasiga nisbatida baholanadi va quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\eta = \frac{Q_3}{Q_{in}}; \quad (13)$$

Mazkur ko'rsatkich tizimning energiya resurslaridan foydalanish darajasini tavsiflab, past haroratli ish rejimlarida issiqlik yo'qotishlarining kamayishi natijasida yuqori qiymatlarga erishishini ko'rsatadi. Energiya balansi asosida olib borilgan tahlillar gidronik issiq pol tizimlarida issiqlik almashinuv jarayonlarini optimallashtirish energiya tejamkorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Gidronik issiq pol tizimining energiya samaradorligini baholashda foydali issiqlik oqimi bilan bir qatorda tizimda yuzaga keladigan issiqlik yo'qotishlarini hisobga olish muhim ahamiyatga ega. Shu sababli issiqlik tashuvchidan tizimga kiritiladigan energiyaning foydali va yo'qotiladigan qismlari o'rtasidagi nisbat umumiy energiya balansini asosida tahlil qilinadi. Ushbu jarayonlarning o'zaro bog'liqligi 2-rasmda sxematik ko'rinishda ifodalangan.



2-rasm. Gidronik issiq pol tizimining umumiy energiya balansini va issiqlik yo'qotishlari sxemasi
Fig. 2. General energy balance and heat loss scheme of a hydronic radiant floor heating system

Rasmda gidronik issiq pol tizimida energiya oqimlarining shakllanishi va uzatilishi ko'rsatilgan bo'lib, tizimga kiritiladigan issiqlik Q_{in} , quyosh nurlanishidan olinadigan qo'shimcha energiya Q_{solar} hamda ichki issiqlik manbalari Q_{int} hisobiga hosil bo'ladigan foydali issiqlik oqimi Q_t va turli yo'nalishlar bo'yicha yuzaga keladigan issiqlik yo'qotishlari Q_{loss} umumiy energiya balansini asosida tavsiflangan. Ushbu sxema tizimning issiqlik samaradorligini baholash va issiqlik yo'qotishlarini kamaytirishga qaratilgan optimal ish rejimlarini aniqlash imkonini beradi [10].

Shunday qilib, gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuv jarayonlari ketma-ket va o'zaro bog'liq bosqichlar orqali amalga oshishi aniqlandi. Dastlab issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga issiqlik uzatilishi energiya balansini va konvektiv issiqlik almashinuvi nazariyasi asosida tavsiflanib, ushbu jarayonning intensivligi Nusselt soni orqali oqim rejimi va issiqlik uzatish sharoitlari bilan bog'landi. Keyingi bosqichda quvvur devoridan pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik tarqalishi Furie qonuni va ekvivalent issiqlik qarshiligi tushunchasi asosida modellashirilib, konstruktiv qatlamlarning issiqlik-texnik xususiyatlari issiqlik oqimiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi asoslab berildi. Yakuniy bosqichda pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi konvektiv va nurlanish mexanizmlarini birgalikda hisobga olgan holda ifodalaniib, foydali issiqlik berish quvvati va issiqlik komfortining shakllanishi tushuntirildi. Ushbu bosqichlarning barchasi umumiy energiya balansini doirasida birlashtirilib, foydali issiqlik oqimi va issiqlik yo'qotishlari o'rtasidagi nisbat orqali gidronik issiq pol tizimining energiya samaradorligini baholash uchun yagona nazariy asos yaratildi.

3. Natijalar (Results)

Yuqorida keltirilgan matematik model gidronik issiq pol tizimida issiqlik almashinuvining barcha asosiy bosqichlarini - issiqlik tashuvchidan quvvur devoriga uzatilish, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik tarqalishi, pol yuzasidan xona havosiga konvektiv va nurlanish yo'li bilan uzatilishi hamda umumiy energiya balansini - yagona hisobiy zanjir doirasida tavsiflash imkonini beradi. Mazkur nazariy asoslar tizimning issiqlik berish quvvati va energiya samaradorligini miqdoriy baholash, shuningdek, asosiy ekspluatatsion va konstruktiv parametrlarning ta'sirini aniqlash uchun asos bo'lib xizmat qildi.

Tadqiqod qilingan model asosida gidronik issiq pol tizimining issiqlik quvvati, issiqlik oqimlarining taqsimlanishi hamda energiya samaradorligi hisobiy-tahliliy usullar yordamida baholandi. Olingan natijalar tizimning issiqlik-energetik samaradorligi, avvalo, issiqlik tashuvchining harorati, quvvur oralig'i va pol konstruksiyasining issiqlik-texnik xususiyatlariga sezilarli darajada bog'liqligini ko'rsatdi.

Hisoblash natijalariga ko'ra, issiqlik tashuvchining harorati oshishi bilan issiq pol tizimi orqali beriladigan issiqlik oqimi ortadi. Xususan, harorati 35°C bo'lgan holatda issiqlik oqimi 45 W/m^2 ni tashkil etgan bo'lsa, ushbu harorat 40°C gacha oshirilganda issiqlik oqimi 62 W/m^2 gacha yetgani kuzatildi (27 % ga ortishi). Bu holat issiqlik tashuvchining harorati bilan pol yuzasi va xona havosi o'rtasidagi haroratlar farqining ortishi natijasida konvektiv va issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarining jadallashuvi bilan izohlanadi.

Quvurlar oralig'ining ta'siri tahlil qilinganda, quvurlar orasidagi masofaning kamayishi issiqlik oqimining ortishiga olib kelishi aniqlanadi. Jumladan, quvur oralig'i $0,15\text{ m}$ bo'lgan holatda issiqlik oqimi 58 W/m^2 ni tashkil etgan bo'lsa, quvur oralig'i $0,20\text{ m}$ ga oshirilganda ushbu ko'rsatkich 49 W/m^2 gacha kamaygan. Bu natija quvurlar zichligining oshishi natijasida pol yuzasida harorat maydonining bir tekisroq taqsimlanishi va issiqlik uzatilish samaradorligining ortishi bilan bog'liqdir. Issiqlik tashuvchining harorati va quvur oralig'i asosiy parametrlarning issiqlik oqimiga ta'siri bo'yicha olingan hisoblash natijalari 1-jadvalda umumlashtirilgan ko'rinishda keltirilgan.

1-jadval. Hidronik issiq pol tizimining asosiy parametrlarining issiqlik oqimiga ta'siri

Table 1. Effect of the main parameters of a hydronic radiant floor heating system on heat flux

Parametr	Qiymat	Issiqlik oqimi, W/m^2
Issiqlik tashuvchining kirish harorati, $^{\circ}\text{C}$	35	45
Issiqlik tashuvchining chiqish harorati, $^{\circ}\text{C}$	40	62
Quvur oralig'i, m	0,15	58
Quvur oralig'i, m	0,20	49

Umumiy energiya balansi asosida tizimning energiya samaradorligi 3.4-bandda keltirilgan ifodaga muvofiq baholandi. Hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, past haroratli ish rejimlarida foydali issiqlik oqimining tizimga kiritilgan issiqlik energiyasiga nisbati yuqori bo'lib, bu holat energiya samaradorligi ko'rsatkichining oshishiga olib keladi. Issiqlik tashuvchining harorati haddan tashqari oshirilishi issiqlik oqimini ko'paytirgan bo'lsa-da, issiqlik yo'qotishlarining ortishi sababli umumiy energiya samaradorligining pasayishiga olib kelishi mumkin.

4. Munozara (Discussion)

Gidronik issiq pol tizimining issiqlik-energetik ko'rsatkichlarini miqdoriy baholash maqsadida 3-bo'limda ishlab chiqilgan matematik model asosida hisoblashlar amalga oshirildi. Hisoblashlar jarayonida issiqlik almashinuvinining barcha bosqichlari - issiqlik tashuvchidan quvur devoriga uzatilish, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali issiqlik tarqalishi, pol yuzasidan xona havosiga konvektiv va nurlanish yo'li bilan uzatilishi hamda umumiy energiya balansi - ketma-ket va o'zaro bog'liq holda hisobga olindi.

Hisoblashlarda issiqlik tashuvchi sifatida suv qabul qilinib, uning fizik xossalari (solishtirma issiqlik sig'imi, issiqlik o'tkazuvchanligi va zichligi) doimiy deb qaraldi. Issiqlik tashuvchining quvurga kirish harorati past haroratli isitish tizimlari uchun xos bo'lgan diapazonda tanlanib, tizimning turli ish rejimlari uchun berish haroratining issiqlik oqimiga ta'siri alohida tahlil qilindi. Quvur ichidagi oqim majburiy konveksiya sharoitida sodir bo'lishi nazarda tutilib, issiqlik uzatish intensivligi Nusselt soni orqali baholandi.

Pol konstruksiyasi qatlamlari uchun beton va issiqlik izolyatsiyasi qatlamlari qabul qilinib, ularning qalinligi va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyentlari amaliy qurilish normalariga mos qiymatlarda belgilandi. Issiqlik tarqalishi qatlamli muhitda issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni sifatida ko'rib chiqilib, ekvivalent issiqlik qarshiligi orqali modellastirildi. Pol yuzasidan xona havosiga issiqlik uzatilishi tabiiy konveksiya va nurlanish mexanizmlarini hisobga olgan holda aniqlanib, xona havosi va atrof-muhit sirtlarining harorati doimiy deb qabul qilindi.

Hisoblash shartlari issiqlik balansining statsionar holati uchun qabul qilinib, tashqi muhit omillarining qisqa muddatli o'zgarishlari inobatga olinmadi. Bunday yondashuv ishlab chiqilgan matematik model asosida gidronik issiq pol tizimining issiqlik berish quvvati, issiqlik oqimlari taqsimlanishi va energiya samaradorligi ko'rsatkichlarini solishtirma tahlil qilish imkonini beradi. Mazkur hisoblash shartlari keyingi kichik bo'limlarda keltiriladigan natijalar va ularning muhokamasi uchun metodik asos bo'lib xizmat qiladi.

Hisoblashlarda qo'llanilgan asosiy geometrik, issiqlik-texnik va ekspluatatsion parametrlar 3-bo'limda ishlab chiqilgan matematik modelga muvofiq tanlanib, ularning qiymatlari amaliy isitish tizimlari uchun xos bo'lgan diapazonlarda belgilandi. Ushbu parametrlar 2-jadvalda umumlashtirilgan.

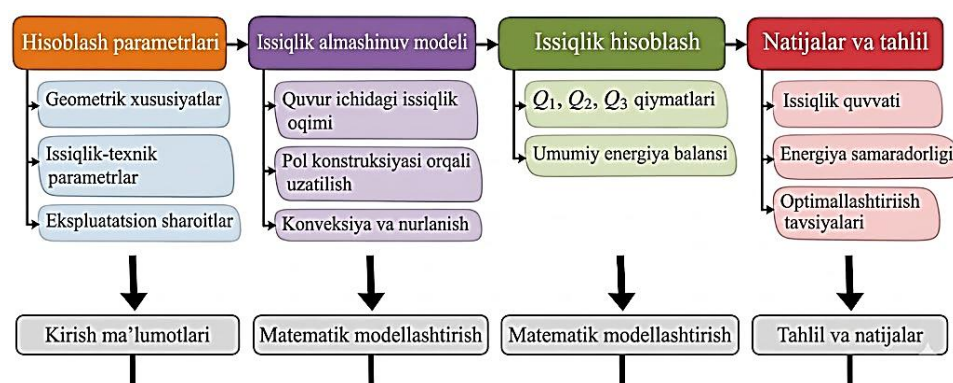
2-jadvalda keltirilgan parametrlar asosida issiqlik tashuvchidan quvur devoriga, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali pol yuzasiga hamda xona havosiga uzatiladigan issiqlik oqimlari hisoblandi. Parametrlarning tanlanishi past haroratli gidronik issiq pol tizimlarining real ekspluatatsion sharoitlarini aks ettiradi va keyingi bo'limda keltiriladigan hisoblash natijalarining amaliy ahamiyatini ta'minlaydi.



2-jadval. Hisoblashlarda qo'llanilgan asosiy geometrik, issiqlik-texnik va ekspluatatsion parametrlar
Table 2. Main geometric, thermophysical and operating parameters used in the calculations

№	Parametr nomi	Belgilanishi	Qiymati	O'lchov birligi
1	Issiqlik tashuvchining massaviy sarfi	m'	0,05 – 0,15	kg/s
2	Issiqlik tashuvchining solishtirma issiqlik sig'imi	c_p	4180	$J/(kg \cdot K)$
3	Issiqlik tashuvchining kirish harorati	t_{in}	35 – 40	$^{\circ}C$
4	Issiqlik tashuvchining chiqish harorati	t_{out}	30 – 34	$^{\circ}C$
5	Quvur ichki diametri	(d)	0,016	m
6	Quvur oralig'i	(s)	0,15 – 0,20	m
7	Beton qatlam qalinligi	δ_{beton}	0,05	m
8	Beton issiqlik o'tkazuvchanligi	λ_{beton}	1,4	$W/(m \cdot K)$
9	Issiqlik izolyatsiyasi qalinligi	δ_{iz}	0,05	m
10	Izolyatsiya issiqlik o'tkazuvchanligi	λ_{iz}	0,035	$W/(m \cdot K)$
11	Pol yuzasi maydoni	A	1,0	m^2
12	Xona havosining harorati	t_{air}	20	$^{\circ}C$
13	Konvektiv issiqlik berish koeffitsiyenti	h_c	5 – 8	$W/(m^2 \cdot K)$
14	Pol yuzasining issiqlik nurlanish emissivligi	ε	0,9	–

Gidronik issiq pol tizimining issiqlik-energetik ko'rsatkichlarini hisoblash metodikasi va matematik modellashirish bosqichlari 3-rasmda sxematik tarzda keltirilgan.



3-rasm. Gidronik issiq pol tizimini hisoblashning umumiy metodik sxemasi

Fig. 3. General methodological scheme for the calculation of a hydronic radiant floor heating system

Ushbu metodik sxema asosida issiqlik tashuvchidan quvur devoriga, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali pol yuzasiga hamda xona havosiga uzatiladigan issiqlik oqimlari aniqlanib, tizimning umumiy energiya balansi va energiya samaradorligi ko'rsatkichlari hisoblandi.

4.1. Hisoblash natijalari va ularning ilmiy muhokamasi. 2-bo'limda ishlab chiqilgan matematik model hamda 4.1-bo'limda keltirilgan hisoblash shartlari va parametrlar asosida gidronik issiq pol tizimining issiqlik berish quvvati, issiqlik oqimlari taqsimlanishi va energiya samaradorligi ko'rsatkichlari aniqlandi. Hisoblash natijalari tizimning issiqlik-energetik holatini baholash va asosiy ekspluatatsion parametrlarning ta'sirini aniqlash imkonini berdi.

Issiqlik berish quvvatining issiqlik berish haroratiga bog'liqligi. Hisoblashlar shuni ko'rsatkichi, issiqlik tashuvchining berish harorati oshishi bilan pol yuzasidan xona havosiga uzatiladigan issiqlik oqimi sezilarli darajada ortadi. Ushbu bog'liqlik 3-jadvalda keltirilgan natijalar bilan tasdiqlanadi.

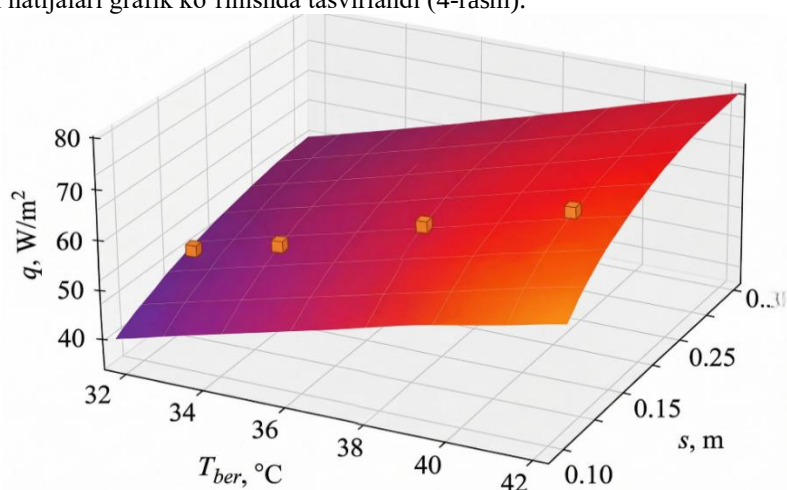
3-jadval. Gidronik issiq pol tizimida berish haroratining issiqlik oqimiga ta'siri

Table 3. Effect of supply temperature on heat flux in a hydronic radiant floor heating system

Issiqlik berish harorati, $^{\circ}C$	Issiqlik oqimi, W/m^2
35	45
40	62

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, berish haroratining $35^{\circ}C$ dan $40^{\circ}C$ gacha oshirilishi issiqlik oqimini 38 % ga ko'paytiradi. Biroq berish haroratining haddan tashqari oshirilishi past haroratli isitish tizimlarining asosiy afzalliklarini - energiya tejamlilik va issiqlik komfortini - pasaytirishi mumkin.

Issiqlik berish harorati va issiqlik oqimi o'rtasidagi bog'liqlikni yanada yaqqolroq ifodalash maqsadida hisoblash natijalari grafik ko'rinishda tasvirlandi (4-rasm).



4-rasm. Issiqlik oqimi zichligining ($q, W/m^2$) issiqlik tashuvchining kirish harorati ($T_{ber}, ^\circ C$) va quvur oralig'i (s, m) ga bog'liqligining uch o'lchamli ko'rinishi. Hisoblashlar statsionar issiqlik uzatish modeli asosida olingan.

Fig. 4. Dependence of heat flux on the heat carrier supply temperature

Grafikdan ko'rinadiki, issiqlik oqimi zichligi qqq issiqlik tashuvchining kirish harorati T_{ber} ortishi bilan uzluksiz ravishda oshib boradi. Bu holat issiqlik tashuvchisi va pol yuzasi o'rtasidagi haroratlar farqining ortishi natijasida issiqlik uzatishning harakatlantiruvchi kuchi kuchayishi bilan izohlanadi. Shu bilan birga, 3D sirt grafigi issiqlik oqimi zichligining nafaqat t_{ber} , balki quvur oralig'i s ga ham sezilarli darajada bog'liqligini ko'rsatadi. Xususan, t_{ber} ning ortishi quvur ichidagi konvektiv issiqlik almashinuvi intensivligini oshirib, quvur devori orqali pol konstruksiyasiga uzatiladigan issiqlik oqimini kuchaytiradi. Natijada pol qatlamlari orqali issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni jadallashib, pol yuzasidan xona muhitiga uzatiladigan issiqlik oqimi zichligi ortadi.

Bundan tashqari, grafikdan ko'rinib turibdiki, quvur oralig'ining sss kamayishi issiqlik oqimi zichligining sezilarli darajada ortishiga olib keladi. Bu holat issiqlik manbalari zichligining ortishi hamda pol yuzasida harorat maydonining yanada bir tekis taqsimlanishi bilan bog'liq. Natijada samarali issiqlik qarshiligi kamayadi va foydali issiqlik uzatilishi ortadi.

Muhimi, nisbatan past kirish haroratlarida ham (past t_{ber} qiymatlarida) quvur oralig'ini optimallashtirish orqali yetarli issiqlik oqimi zichligiga erishish mumkinligi aniqlanadi. Ushbu natijalar gidronik issiq pol tizimlarining past haroratli issiqlik manbalari bilan samarali ishlashini hamda energiya tejamlor isitish texnologiyasi sifatidagi ustunliklarini tasdiqlaydi.

Olingan hisobiy natijalar ishlab chiqilgan matematik modelning amaliy qo'llanilishini tasdiqlab, gidronik issiq pol tizimlarining past haroratli ish rejimlarida yuqori energiya samaradorligini ta'minlash imkoniyatini ilmiy jihatdan asoslab berdi.

5. Xulosa (Conclusion)

Mazkur tadqiqotda gidronik issiq pol tizimida yuz beradigan issiqlik almashinuv jarayonlari matematik modellashtrish asosida kompleks tahlil qilindi. Issiqlik tashuvchidan quvur devoriga, pol konstruksiyasi qatlamlari orqali pol yuzasiga hamda yakuniy bosqichda xona havosiga issiqlik uzatilishining asosiy bosqichlari fizik va matematik jihatdan asoslab berildi. Ishlab chiqilgan matematik model issiq pol tizimining issiqlik berish quvvatini, issiqlik oqimlarining taqsimlanishini hamda turli ish rejimlarining energiya samaradorligiga ta'sirini miqdoriy baholash imkonini beradi.

Olingan natijalar gidronik issiq pol tizimlarini loyihalash va ekspluatatsiya qilishda muhim amaliy ahamiyat kasb etadi. Xususan, ular issiqlik tashuvchining kirish haroratini asosli tanlash, quvur oralig'ini optimallashtirish hamda pol konstruksiyasining issiqlik-fizik parametrlarini (issiqlik o'tkazuvchanlik, zichlik va issiqlik sig'imi) maqsadga muvofiq aniqlash imkonini beradi. Taklif etilgan matematik model tizim darajasida issiqlik uzatish jarayonlarini kompleks baholashga xizmat qilib, energiya sarfini kamaytirish, issiqlik yo'qotishlarini cheklash hamda binolarda issiqlik komfortini ta'minlashga qaratilgan energiya tejamlor texnik yechimlarni ishlab chiqishda qo'llanilishi mumkin.

Kelgusida olib boriladigan tadqiqotlar gidronik issiq pol tizimlarida issiqlik almashinuv jarayonlarini yanada chuqurroq modellashtrishga, xususan, nostatsionar issiqlik o'tkazish jarayonlarini hisobga olgan holda tizimning dinamik ish rejimlarini tahlil qilishga yo'naltiriladi. Bunda tashqi muhit haroratining o'zgarishi, issiqlik yuklamasining vaqt bo'yicha notekis taqsimlanishi hamda boshqaruv



algoritmlarining tizim samaradorligiga ta'siri alohida e'tiborga olinadi. Shuningdek, gidronik issiq pol tizimlarini past haroratli qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalashgan holda o'rganish hamda taklif etilgan matematik modelni tajriba natijalari asosida verifikatsiya qilish kelgusidagi ilmiy izlanishlarning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi.

ADABIYOT

1. Аллаев К.Р. Замоновий энергетика ва унинг ривожланиш истиқболлари. Академик А.У. Салимов умумий таҳрири остида. -Т.: “Фан технологиялар нашриёт –матбаа уйи”, 2021. 952 б.
2. Захидов Р.А., Анарбаев А.И. Комбинированная система солнечного теплоснабжения с применением теплового насоса. // Гелиотехника. №3. 2014. - С. 19-25.
3. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. - 4th ed. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. - 928 p.
4. Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. - 2nd ed. - Oxford: Academic Press, 2014. – 816 p.
5. Hepbasli A., Kalinci Y. A review of heat pump water heating systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – Vol. 13, No. 6-7. – P. 1211–1229.
6. Uzakov G.N., Khamraev S.I., Khuzhakulov S.M. Rural house heat supply system based on solar energy // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1030 (2021) 012167 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012167.
7. S I Khamraev. Study of the combined solar heating system of residential houses. *BIO Web of Conferences* 71, 02017 (2023) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102017> CIBTA-II-2023.
8. Zhai X. Q., Wang R. Z., Wu J. Y. A review of solar-assisted heat pump systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, No. 6. - P. 2863–2875.
9. ISO 52000-1:2017. Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. - 180 p.
10. EN 15316-1:2017. Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. – Brussels: CEN, 2017. - 120 p.
11. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-412-421>.
12. Авезова Н.Р., Авезов Р.Р., Рузиев О.С., Вахидов А.У., Сулейманов Ш.И. Ресурсные показатели плоских солнечных водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения. Часть I. Методика расчета теплопроизводительности коллектора. // Гелиотехника. №1. 2013. – С. 7-20.
13. Авезова Н.Р., Авезов Р.Р., Рузиев О.С., Вахидов А.У., Сулейманов Ш.И. Ресурсные показатели плоских солнечных водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения. Часть II. Исходные данные для расчетов (Внешние факторы). // Гелиотехника. №2. 2013. – С. 18-27.

REFERENCES

1. Allaev K.R. *Modern Energy and Prospects for Its Development*. Under the general editorship of Academician A.U. Salimov. Tashkent: Fan va Texnologiyalar Publishing House, 2021. 952 p.
2. Zakhidov R.A., Anarbaev A.I. Combined solar heating and cooling supply system using a heat pump. *Heliotechnika*, 2014, No. 3, pp. 19–25.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 928 p.
4. Kalogirou S.A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2014. 816 p.
5. Hepbasli A., Kalinci Y. A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, Vol. 13, No. 6–7, pp. 1211–1229.
6. Uzakov G.N., Khamraev S.I., Khuzhakulov S.M. Rural house heat supply system based on solar energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1030, 012167. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012167>.
7. Khamraev S.I. Study of the combined solar heating system of residential houses. *BIO Web of Conferences*, 2023, Vol. 71, 02017. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102017>.
8. Zhai X.Q., Wang R.Z., Wu J.Y. A review of solar-assisted heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, Vol. 15, No. 6, pp. 2863–2875.

9. ISO 52000-1:2017. *Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment*. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 180 p.
10. EN 15316-1:2017. *Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2017. 120 p.
11. Uzakov G.N., Charvinski V.L., Ibragimov U.Kh., Khamraev S.I., Kamolov B.I. Mathematical modeling of the combined heat supply system of a solar house. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2022, Vol. 65, No. 5, pp. 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-412-421>.
12. Avezova N.R., Avezov R.R., Ruziev O.S., Vakhidov A.U., Suleimanov Sh.I. Resource indicators of flat solar water-heating collectors in hot water supply systems. Part I. Method for calculating collector heat productivity. *Heliotechnika*, 2013, No. 1, pp. 7–20.
13. Avezova N.R., Avezov R.R., Ruziev O.S., Vakhidov A.U., Suleimanov Sh.I. Resource indicators of flat solar water-heating collectors in hot water supply systems. Part II. Initial data for calculations (external factors). *Heliotechnika*, 2013, No. 2, pp. 18–27.