



**ENERGIYA TEJAMKOR TEXNOLOGIYALAR VA QURILMALAR//
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТАНОВКИ//ENERGY
SAVING TECHNOLOGIES AND INSTALLATIONS**

UO‘K 621.43.036.62

**HAVONI BEVOSITA BUG‘LATISHLI SOVITISH TIZIMINING
ENERGIYA BALANSINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH**

Ibragimov Umidjon Xikmatullayevich - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent,
ORCID: 0000-0002-8848-0971, e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Ergashev Shahriyor Hamidullayevich - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent,
ORCID: 0000-0002-3336-9942, e-mail: strong.shakhriyer@mail.ru

Botirov Akbar Sodiq o‘g‘li - doktorant (PhD)

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Hozirgi vaqtda dunyo bo‘yicha energiya iste‘molining 20% qismi binolarda havoni maromlashda foydalaniladigan maishiy maromlagichlar hissasiga to‘g‘ri keladi va ularning o‘rnatilgan quvvati 1220 TVt-soat/yil ni tashkil etadi. Maishiy maromlagichlardan foydalanish sur‘ati shunday davom etsa, 2050 yilga borib elektr energiya iste‘moli 1940 TVt-soat/yil (31,8%) gacha ortadi Demak, binolarda havoni sovitish va namlantirish tizimlarida solishtirma energiya iste‘molini kamaytirishda an‘anaviy maromlagichlarning o‘rnini bosuvchi bug‘latishli sovitish qurilmalaridan foydalanish eng maqbul yechim hisoblanadi.

Usul va materiallar. Binolarda havoni sovitish va namlantirish uchun taklif etilayotgan bug‘latishli sovitish qurilmalarining energetik samaradorligini baholashda bug‘latishli sovitish qurilmasining prinsipial sxemasi va bug‘latishli sovitish qurilmasida issiqlik va massa almashinuv jarayonlarini nazariy tadqiqot qilish imkonini beradigan energiya balansi tenglamalari asosidagi matematik model ishlab chiqildi va sonli tadqiqot qilindi.

Natijalar. Sonli tadqiqot asosida havoning kirishdagi nisbiy namligi 30 dan 75% gacha ortganda, namlanuvchanligi 370, 475 va 630 m²/m³ bo‘lgan nasadka uchun haroratlar farqi mos ravishda 92,31%, 84,22% va 76,39% ga, namliklar farqi 61,54%, 62,77% va 67,07% ga, to‘yinganlik samaradorligi 77,21%, 47,48% va 24,31% ga kamayishi, shuningdek, quruq iqlim sharoitida havoning kirishdagi harorati eng past bo‘lganda bug‘latishli sovitish qurilmasining unumdorligi eng yuqori bo‘lishi aniqlandi.

Xulosa. Binolarda havoni sovitish va namlantirish uchun taklif etilgan bug‘latishli sovitish tizimini joriy etish orqali binolarda havoni sovitish va namlantirish tizimlariga solishtirma energiya sarfi sezilarli kamayadi, ichki havoning doimiy yangilanib turishi hisobiga bino ichida qulay iqlim sharoiti ta‘minlanadi.

Kalit so‘zlar: bino, bug‘latishli sovitish, nasadka, nam havo, tashqi havo, nisbiy namlik, to‘yinish samaradorligi.

Дата поступления: 14.02.2025. После обработки: 28.02.2025. Принято печать: 24.03.2025.

For citation: Ibragimov U.X., Ergashev Sh.H., Botirov A.S. Mathematical modeling of the energy balance of a direct evaporative air cooling system. Alternative energy. 2025. 1(16). pp. 83-93. (In Uzb.)



УДК 621.43.036.62

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА СИСТЕМЫ ПРЯМОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

Ибрагимов Умиджон Хикматуллаевич - доктор философии по техническим наукам, доц.

ORCID: 0000-0002-8848-0971, e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Эргашев Шахриёр Хамидуллаевич - доктор философии по техническим наукам, доц.

ORCID: 0000-0002-3336-9942, e-mail: strong.shakhrier@mail.ru

Ботиров Акбар Содик угли – докторант

Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. В настоящее время 20% мирового потребления энергии приходится на бытовые кондиционеры, используемые для охлаждения воздуха в зданиях, а их установленная мощность составляет 1220 ТВт·ч/год. При сохранении таких темпов использования бытовых кондиционеров к 2050 году потребление электроэнергии увеличится до 1940 ТВт·ч/год (31,8%). Поэтому наиболее рациональным решением для снижения удельного потребления энергии в системах охлаждения и увлажнения воздуха в зданиях является использование испарительных охладительных установок, заменяющих традиционные кондиционеры.

Методы и материалы. Разработана математическая модель на основе уравнений энергетического баланса позволяющие теоретически исследовать процессы теплообмена в испарительном охлаждающем устройстве и принципиальная схема системы испарительного охлаждения для оценки энергоэффективности испарительных охлаждающих устройств, предлагаемых для охлаждения и увлажнения воздуха в зданиях и проведены численные исследования.

Результаты. На основании численного исследования установлено, что при увеличении относительной влажности воздуха на входе от 30 до 75% разность температур для насадки со смачиваемостью 370, 475 и 630 м²/м³ уменьшается на 92,31%, 84,22% и 76,39%, разность влажности на 61,54%, 62,77% и 67,07%, эффективность насыщения на 77,21%, 47,48% и 24,31% соответственно, а эффективность испарительного охладительного устройства наиболее высока при самой низкой температуре воздуха на входе в условиях сухого климата.

Заключение. Внедрение предлагаемой системы испарительного охлаждения и увлажнения воздуха в зданиях позволит значительно снизить удельное энергопотребление систем охлаждения и увлажнения воздуха в зданиях, а также за счет постоянного обновления воздуха обеспечить комфортные условия в зданиях.

Ключевые слова: здание, испарительное охлаждение, насадка, влажный воздух, наружный воздух, относительная влажность, эффективность насыщения.

UDC 621.43.036.62

MATHEMATICAL MODELING OF THE ENERGY BALANCE OF A DIRECT EVAPORATIVE AIR COOLING SYSTEM

Ibragimov Umidjon Xikmatullayevich - PhD, docent,

ORCID: 0000-0002-8848-0971, e-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Ergashev Shahriyor Hamidullayevich - PhD, docent,

ORCID: 0000-0002-3336-9942, e-mail: strong.shakhrier@mail.ru





Botirov Akbar Sodik ugli - doctoral student (PhD)

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Currently, 20% of the world's energy consumption is accounted for by domestic air conditioners used to cool the air in buildings, and their installed capacity is 1220 TWh/year. If the current rate of use of domestic air conditioners continues, by 2050 electricity consumption will increase to 1940 TWh/year (31.8%). Therefore, the most rational solution for reducing the specific energy consumption in cooling and humidifying systems in buildings is the use of evaporative cooling units replacing traditional air conditioners.

Methods and materials. A mathematical model based on energy balance equations has been developed, allowing theoretical investigation of heat and mass transfer processes in an evaporative cooling device, and a basic diagram of an evaporative cooling system for assessing the energy efficiency of evaporative cooling devices proposed for cooling and humidifying air in buildings, and numerical studies have been carried out.

Results. Based on the numerical study, it was found that with an increase in the relative humidity of the inlet air from 30 to 75%, the temperature difference for the packing with a wettability of 370, 475 and 630 m²/m³ decreases by 92.31%, 84.22% and 76.39%, the humidity difference by 61.54%, 62.77% and 67.07%, the saturation efficiency by 77.21%, 47.48% and 24.31%, respectively, and the efficiency of the evaporative cooling device is highest at the lowest inlet air temperature in dry climate conditions.

Conclusion. The implementation of the proposed system of evaporative cooling and air humidification in buildings will significantly reduce the specific energy consumption of cooling and air humidification systems in buildings, and also ensure comfortable conditions in buildings due to the constant renewal of air.

Key words: building, evaporative cooling, packing, humid air, outside air, relative humidity, saturation efficiency.

Kirish

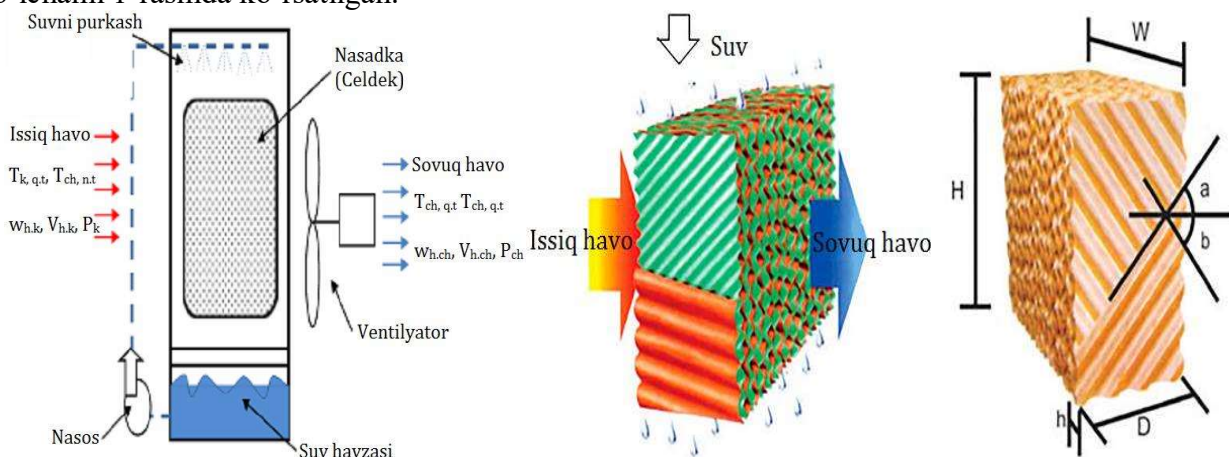
Jahonda binolarni sovitishda energiya iste'molini kamaytirish uchun havoni bevosita bug'latishli sovitish tizimi (BST) energiya samarador texnologiya hisoblanadi. BSTda suvni bug'latish yo'li bilan oshkora issiqlik yashirin issiqlikka o'zgartiriladi [1-6]. BSTda havo va suv o'zaro ta'sirlashadi, bunda havoning harorati pasayadi va namligi ortadi [7]. BST quyidagi afzalliklarga ega: qurilma sodda, havoning sifati yuqoriligi sababli xona ichida qulay iqlim sharoiti hosil bo'ladi, ekologik toza, xizmat ko'rsatishda sodda, sovitish samaradorligi yuqori, energiya samarador, qurilmaning narxi arzon va hokazo [8]. BSTga turli parametrlar ta'sir ko'rsatadi: material qalinligi, ho'llanuvchanlik, material turi, teshiklar o'lchami, yuza maydoni, suyuqlik oqimining turi va xokazo [9]. BST yashash binolarida, issiqxona, chorvachilik va parrandachilik majmualarida, mahsulot saqlash omborlarida keng qo'llaniladi [10].

Bir nechta tadqiqotchilar BST ustida izlanishlar va tajriba tadqiqotlarini o'tkazishgan. Dhamneya va boshqalar [11] tomonidan bevosita BSTda nasadkalarining turli konfiguratsiyalari tadqiqot qilingan. Havo oqimining tezligi, harorati va namligini uchburchak konfiguratsiyali nasadkaga ta'siri o'rganilgan. Natijalarga ko'ra, to'yinish samaradorligi 97% ni tashkil etgan. Malli va boshqalar [12] gofrlangan qog'ozdan tayyorlangan ikki turdagi nasadkani tadqiqot qilishgan. Bunda nasadkaning uchta qalinligidan foydalanishgan: 75, 100 va 150 mm. Unumdorlik parametrlari kirishdagi tezlik turlicha bo'lganda baholangan. Natijalarga ko'ra, nasadka qalinligi va havo oqimining tezligi unumdorlikka sezilarli ta'sir ko'rsatgan. Namlantirishning maksimal samaradorligi 85% ga yetgan. Namlantirish parametrlarini nazariy tadqiqot qilish uchun Ghalavand va boshqalar [13] tomonidan matematik model ishlab chiqilgan. Natijalarga ko'ra, nazariy natijalar bilan tajriba natijalarining o'rtasidagi farq 7,5% ni tashkil etgan. BST samaradorligini nazariy tadqiqot qilish uchun massa va energiyani bog'lovchi sonli model Eslamimanes va Hatamipourlar [14] tomonidan ishlab chiqilgan. Kirish parametrlari sifatida havo va suvning harorati, havo

oqimining tezligi qabul qilingan. Natijalarga ko'ra, havo oqimining tezligi va suvning sarfi BST unumdorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatgan. Wu va boshqalar [15] BST uchun issiqlik va massa almashinuv modelini ishlab chiqishgan bo'lib, bunda havo va suvning o'zaro ta'siri oqimning ko'ndalang yo'nalishida amalga oshirilgan. Havo oqimi tezligi va nasadka qalinligining sovitish samaradorligiga ta'siri ko'rib chiqilgan. Havo oqimining tezligi 2,5 m/s bo'lganda optimal natijalar olingan va sovitishning maksimal samaradorligi 90% ni tashkil etgan. Fouda va Melikyanlar [16] tomonidan bevosita BST uchun issiqlik va massa almashinuv modeli ishlab chiqilgan. Energiya tenglamasida issiqlik manbai sifatida bug'lanishning yashirin issiqligi, massa uzatish tenglamasida massa manbai sifatida bug'langan suv massasi qabul qilingan. Nazariy natijalar tajriba natijalari bilan yaxshi mos kelgan va namlantirish samaradorligi 90% ni tashkil etgan. Ko'rib chiqilgan ko'p sonli tadqiqotlarning tahlillari asosida, sovitish samaradorligi turli ishchi va konstruktiv parametrlarga, nasadkaning turi va konfiguratsiyasiga, havo tezligiga, suvning sarfi va haroratiga, tashqi havoning harorati va namligiga bog'liq ekanligi aniqlandi. Shuningdek, ushbu modellar bir yoki ikkita parametrlarni bashorat qilish imkonini beradi. Bundan tashqari, namlanuvchanlik, nasadka qalinligi va tashqi iqlim sharoitlarini inobatga olgan holda unumdorlikni aniqlash bo'yicha tadqiqotlar kam sonli ishlarda keltirilgan. Yuqoridagilarni inobatga olgan holda BSTda namlanuvchanlik qiymati, nasadka qalinligi, havo oqimining tezligi, tashqi iqlim sharoitlarini inobatga oluvchi matematik model ishlab chiqildi.

Usul va materiallar

BSTning prinsipial sxemasi, namlovchi materialning (Celdek) ko'ndalang qirgimi va o'lchami 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. BSTning prinsipial sxemasi (a), namlovchi materialning (nasadka) qirgimi (b) va o'lchamlari (v): H-nasadka balandligi, D-qalinligi, W-kengligi; a, b-kanal burchagi

Fig. 1. The principle scheme of the BST (a), the cross-section of the wetting material (sleeve) (b) and its dimensions (v): H-sleeve height, D-thickness, W-width; a, b-channel angle

Nasadkaning balandligi H , kengligi W , qalinligi D , nasadka hajmi V_n va namlanuvchanlik β bo'lsin. Havo va suv to'qnashadigan yuza maydoni A . Nasadka hajmi va nasadka yuzasining umumiy maydoni (1) va (2) tenglamalar yordamida, xarakterli uzunlik (3) tenglama yordamida aniqlanadi:

$$V_n = H \cdot D \cdot W \quad (1)$$

$$A_n = V_n \beta \quad (2)$$

$$L = \frac{V_n}{A_n} = \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

Xarakterli uzunlik namlanuvchanlikka teskari kattalik sifatida qabul qilinadi. Issiqlik va massa almashinuvini tahlili uchun nasadka bir tekis taxlangan va bir tekis namlanadi deb faraz qilamiz. Bunda bunda K -bug'lanishda massa uzatish koeffitsiyenti, h -konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti.

Matematik modellashtirishda quyidagi taxminlar qabul qilinadi:



- suv va havoning issiqlik xususiyatlari o'zgarishidan qoladi (barqaror holat);
- nasadka bir tekis namlanadi;
- suv va havoning ajralish chegarasida harorat o'zgarishidan qoladi;
- tashqi muhitga yo'qotilayotgan issiqlik miqdori inobatga olinmaydi;
- havo suvga yaqin bo'lib, suv va havoning o'zaro ta'sirlashuvi to'yingan havoni ifodalaydi, yuza yaqinidagi harorat nasadkaga purkalgan suv haroratiga teng;
- kinetik va potensial energiyalarning o'zgarishi inobatga olinmaydi;
- bug'langan suvni o'rniga nasos yordamida uzatilayotgan qo'shimcha suvning adiabatik to'yinish harorati kirayotgan havoniki kabi bir xil;
- quruq havo va suv bug'idan tashkil topgan nam havo ideal gazli aralashma sifatida ko'riladi;
- BSTning ichida bosim yo'qotilishi inobatga olinmaydi.

Issiqlik uzatish koeffitsiyentini aniqlash uchun o'lichamsiz sonlardan foydalanildi. Reynolds, Prandtl va Nusselt sonlari (4)-(6) tenglamalar bo'yicha hisoblanadi, bunda w -havoning o'rtacha tezligi, m/s; l_x -xarakterli uzunlik, m; ν -havoning kinematik qovushqoqlik koeffitsiyenti, m^2/s ; k -issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $Wt/(m \cdot ^\circ C)$; μ -dinamik qovushqoqlik koeffitsiyenti, $Pa \cdot s$; h -konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti, c_p -havoning solishtirma issiqlik sig'imi, $J/(kg \cdot ^\circ C)$:

Reynolds soni:

$$Re = \frac{w \cdot l_x}{\nu} \quad (4)$$

Prandtl soni:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (5)$$

Nusselt soni:

$$Nu = \frac{h \cdot l}{k} = 0,1 \left(\frac{l_x}{l} \right)^{0,12} Re^{0,8} Pr^{0,33} \quad (6)$$

bu yerda $l_x = V_n/A_{nam} = 1/\xi$ -xarakterli uzunlik, m; A_{nam} -namlangan yuzaning umumiy maydoni (issiqlik uzatish yuzasi maydoni), m^2 .

Yuqoridagi ushbu bog'liqliklar asosida konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti hisoblanadi. Maydonning differensial elementi dA uchun bug'lanish jarayonida havodan olib ketilgan oshkora issiqlik (7) tenglama yordamida aniqlanadi. Oshkora issiqlik havoning haroratini o'zgarishi hisobiga va yashirin issiqlik suvni bug'lanishi hisobiga sodir bo'ladi. Havodan suvga uzatilgan issiqlik miqdori:

$$Q_o = m_h c_p dt = h dA (t_h - t_s) \quad (7)$$

bu yerda m_h -quruq havoning massaviy sarfi, kg/s :

$$m_h = w_h \rho_h A = V_h \rho_h H W \quad (8)$$

bu yerda dA -nasadkaning namlangan yuzasining umumiy maydonini o'zgarishi;

$$dA = \beta \cdot l \cdot H \cdot dD \quad (9)$$

bu yerda w_h -havoning tezligi, m/s; ρ_h -havoning zichligi, kg/m^3 ; A -nasadkaning ko'ndalang kesimi yuzasi, m^2 .

Yuqoridagi (9) tenglamani (7) tenglamaga qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$dQ_o = m_h c_p dt = h \cdot \beta \cdot l \cdot H \cdot dD (t_h - t_s) \quad (10)$$

Bug'lanish tezligi-suvning suyuq holatdan bug'simon holatga o'tishidagi (havoda suvni bug'lanish tezligi) yashirin bug'lanish issiqligi bo'lib, quyidagicha aniqlanadi:

$$dm_s = m_h d\varphi = m_h (\varphi_o - \varphi_b) = h_m (\varphi_o - \varphi_b) dA \quad (11)$$

bu yerda h_m -massa uzatish koeffitsiyenti, $kg/(m^2 \cdot s)$; φ_b , φ_o -quruq va to'yingan havoning solishtirma namligi, g/kg .

Suvni bug'lanishi hisobiga havoga uzatilgan yashirin issiqlik:

$$dQ_{ya} = r \cdot dm_s = r \cdot h_m (\varphi_o - \varphi_b) dA \quad (12)$$

bu yerda r -yashirin bug'lanish issiqligi, J/kg .

Oshkora issiqlik yashirin issiqlikka o'zgaradi va bu o'zgarish suvni bug'lanishiga olib keladi, natijada havoning chiqishdagi namligi ortadi va harorati pasayadi, ya'ni:

$$dQ_o = dQ_{ya} \quad (13)$$

$$hdA(t_h - t_s) = r \cdot h_m(\varphi_o - \varphi_b)dA \quad (14)$$

Agar Le -Lyuis soni bo'lsa, uni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$Le = \frac{h}{kc_p} \quad (15)$$

$Le=1$ taxminga asosan:

$$\frac{h}{k} = c_p, c_p = \frac{\varphi_o - \varphi_b}{t_h - t_s} r \quad (16)$$

$D = 0$ bo'lganda $t_h = t'_h$ va $\varphi_h = \varphi'_h$ chegaraviy shartni qo'llab, (7)-(14) tenglamalarni yechamiz, natijada havoning chiqishdagi harorati va solishtirma namligini aniqlash imkonini beradigan tenglamalarga ega bo'lamiz:

$$t''_h = t_s + (t'_h - t_s)e^{\left(\frac{h\beta lHD}{m_h c_p}\right)} \quad (17)$$

$$\varphi''_h = \varphi_o - \frac{c_p}{r}(t'_h - t_s)e^{\left(\frac{h\beta l}{m_h c_p}\right)} \quad (18)$$

bu yerda t_s -nam termometr harorati, °C.

Yuqorida keltirilgan (7) tenglamani integrallaymiz:

$$\int_{t_{q,t,b}}^{t_{q,t,o}} \frac{dt}{t_h - t_s} = \int_0^A \frac{h}{m_h c_p} dA \quad (19)$$

Integral asosida quyidagi natijaga ega bo'lamiz:

$$\frac{t_s - t_{q,t,o}}{t_s - t_{q,t,b}} = \exp\left(\frac{-Ah}{m_h c_p}\right) \quad (20)$$

bu yerda $t_{q,t}$ -quruq termometr harorati, °C.

Sovitish samaradorligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{t_{q,t,b} - t_{q,t,o}}{t_{q,t,b} - t_s} \quad (21)$$

Yuqoridagi (21) tenglamani (20) tenglamaga qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{-Ah}{m_h c_p}\right) \quad (22)$$

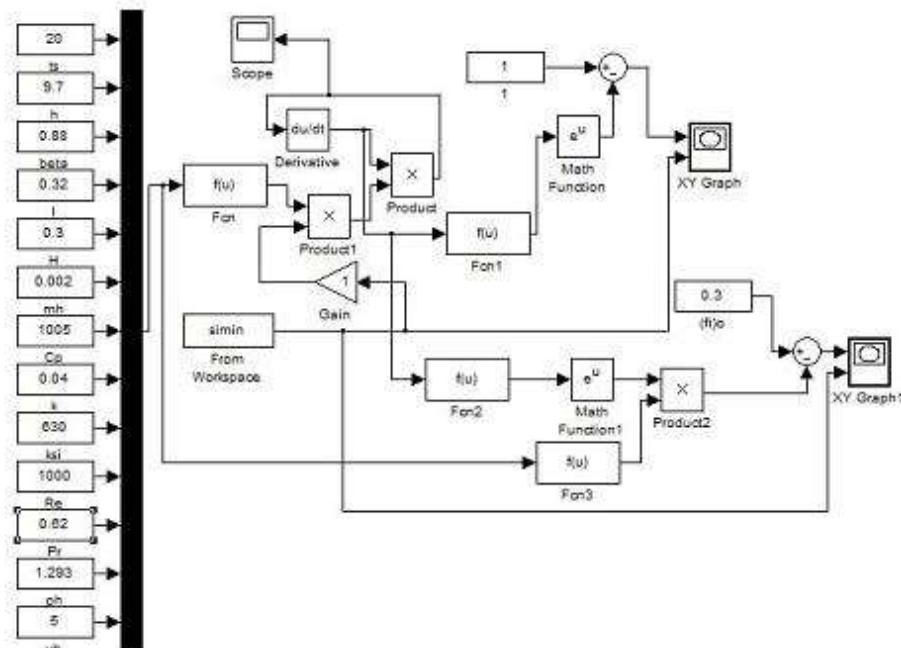
Yuqoridagi (2.38)-(2.40) tenglamalar asosida quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{-0,1 \cdot k \cdot l^{-1,12} \cdot \xi^{-0,12} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}}{\rho_h W_h c_p}\right) \quad (23)$$

Dastlab (1)-(23) tenglamalarda ko'rsatilgan model quriladi va MATLAB Simulink dasturiy vositasida dasturlashtiriladi. Turli namlanuvchanlik uchun kirish parametrlari sifatida havo sarfi, havoning harorati va namligi, nasadka qalinligi qabul qilinadi va o'lchamsiz sonlar aniqlanadi. BSTda Celdek nasadkasidan foydalanilgan bo'lib, u quyidagi afzalliklarga ega: namlanuvchanligi yuqori, xizmat ko'rsatishda oson, bakteriyalar kam to'planadi, yuqori tejamkor, yuqori sifatli havo bilan ta'minlaydi, o'rnatish oson, uzoq muddat xizmat qiladi, bosim yo'qotilishi kichik, ekologik toza, yuzaviy zichlik yuqori va ko'p miqdorda suvni tutish qobiliyatiga ega. Issiqlik xususiyatlari quyidagicha: issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti $0,040 \text{ Wt}/(m \cdot ^\circ\text{C})$, solishtirma issiqlik sig'imi $1,6 \text{ kJ}/(kg \cdot ^\circ\text{C})$, issiqlikdan kengayish koeffitsiyenti $13,6 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ va issiqlik kuchlanishi 65 MPa . Bunday turdagi nasadka turli shakl va konfiguratsiyalarga ega. Ularda kesishish burchaklari 30 dan 60° gacha o'zgaradi. Ishlab chiqaruvchilarning ta'kidlashicha namlovchanlik qiymati 370 dan $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ gacha oraliqda bo'lib, ushbu tadqiqot ishida namlovchanlikning 370, 475 va $630 \text{ m}^2/\text{m}^3$ qiymatlari tadqiqot qilingan.

Natijalar va muhokama

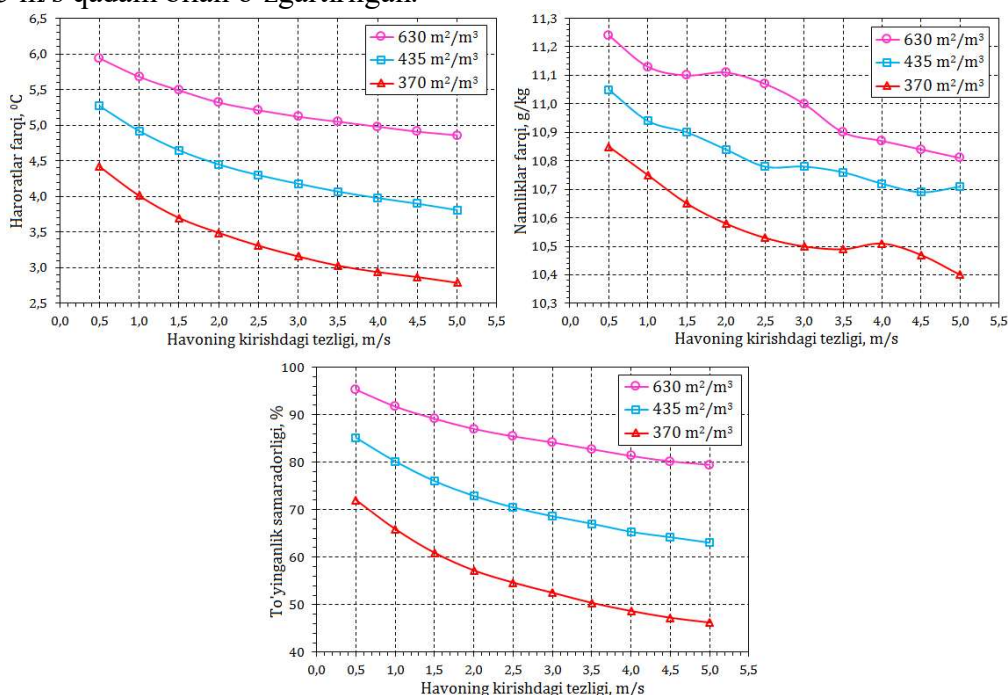
Taklif etilgan modelning MATLAB Simulink dasturiy vositasidagi blok-sxemasi 2-rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. BSTda havoning harorati va namligini o‘zgarishini hisoblashning matematik modelini Matlab/Simulink dasturidagi blok-sxemasi

Fig. 2. Block diagram of the mathematical model for calculating changes in air temperature and humidity in the BST in Matlab/Simulink.

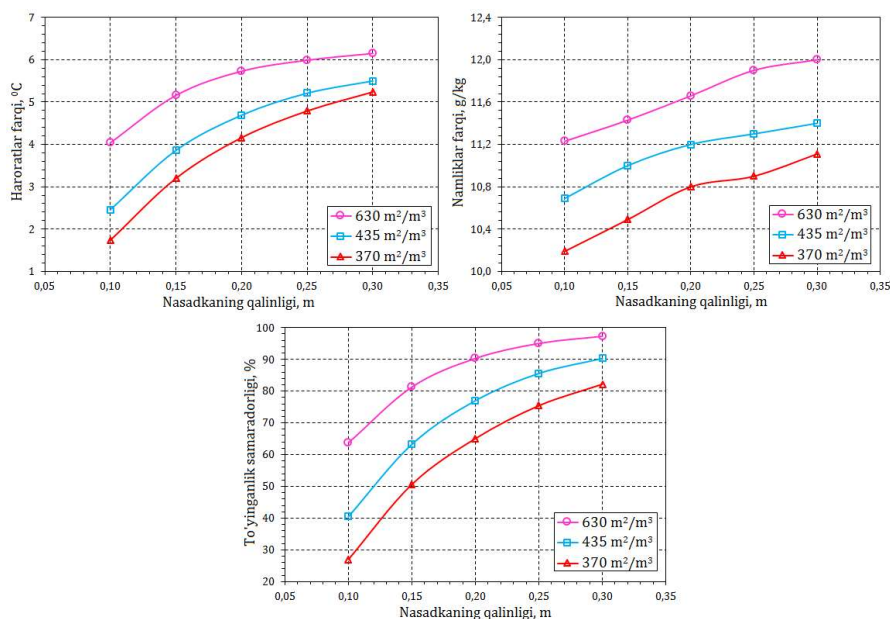
Celdek nasadkali BSTda havoni namlantirish bo‘yicha nazariy tadqiqotlar havoning kirishdagi tezligini o‘zgartirish yo‘li bilan olib borilgan. Suvning sarfi o‘zgarmas 0,6 l/min, havoning kirishdagi harorati 31°C va nisbiy namligi 60% qabul qilingan. Hisoblashlar natijasida havoning chiqishdagi harorati va nisbiy namligi aniqlangan bo‘lib, ushbu qiymatlar asosida havoning kirish va chiqishdagi harorati va namligi o‘rtasidagi farq hisoblangan. Havoning kirish va chiqishdagi haroratlari va nisbiy namligi o‘rtasidagi farqni havoning kirishdagi tezligiga bog‘liq holda o‘zgarishi 3-rasmda ko‘rsatilgan. Ushbu tadqiqotda havoning kirishdagi tezligi 0,5 dan 5 m/s gacha, 0,5 m/s qadam bilan o‘zgartirilgan.



3-rasm. Havoning tezligi turlicha bo‘lganda ishchi parametrlarning o‘zgarishi natijalari
Fig. 3. Results of changes in operating parameters when air velocity varies

Yuqoridagi 3-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, havoning kirishdagi tezligini ortishi bilan harorat va namliklar farqi kamayib borgan. Nasadka qalinligi, havoning kirishdagi harorati va havoning nisbiy namligi mos ravishda 0,1 m, 31°C va 60% qabul qilingan. Havoning tezligini ortishi bilan havoning massaviy sarfi ham ortadi. Yuqori tezlik bilan harakatlanayotgan havo nasadkadan tez oqib o'tadi, bu havoni nasadka ichida suv bilan to'qnashish va turish vaqtini qisqarishiga olib keladi. Natijada nasadka ichida issiqlik va massa almashinuv jarayonining jadalligi kamayadi. Shuningdek, kam miqdordagi suvni bug'lanishi oqibatida harorat va namliklar farqi ham keskin kamayadi. Grafikdagi natijalarga ko'ra, namlanuvchanlikni ortishi unumdorlikni oshiradi. Shuningdek, rasmda havo oqimining tezligiga bog'liq holda to'yinganlik samaradorligining o'zgarishi ko'rsatilgan. Namlik miqdori o'zgarmas bo'lganda havoning tezligini ortishi bilan to'yinganlik samaradorligi va haroratlar farqi kamayadi. Biroq, havoning yuqori tezliklarida massaviy sarfni ortishi hisobiga sovitish samarasi ortadi. Shuningdek, namlanuvchanlik juda yuqori bo'lganda samaradorlik va sovitish samarasi yuqori bo'ladi. Tezlikni yuqori bo'lishi bosim yo'qotilishini oshiradi va to'yinish samaradorligi kamayadi. Natijalarga ko'ra, namlanuvchanlik $630 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bo'lganda va havoning tezligi 0,5 dan 5 m/s gacha oshganda haroratlar farqi, namliklar farqi va to'yinganlik samaradorliklari mos ravishda 22,22%, 3,98% va 15,82% ga kamaygan. Havoning tezligi 2,5 m/s bo'lganda va namlanuvchanlik 370 dan $630 \text{ m}^2/\text{m}^3$ gacha oshganda haroratlar farqi, namliklar farqi va to'yinganlik samaradorligi mos ravishda 57,40%, 5,13% va 30,78% ga oshgan.

Nasadkaning qalinligi ham nasadkaning unumdorligiga ta'sir etuvchi kritik parametrdan biri hisoblanadi. Ushbu tadqiqot ishida nasadka qalinligi 0,1 dan 0,3 m gacha o'zgaradi, bunda havoning kirishdagi tezligi 3 m/s, harorati 31°C va nisbiy namligi 60%. Nasadkaning qalinligi 0,1 dan 0,3 m gacha o'zgaranda havoning haroratlar farqi, namliklar farqi va to'yinganlik samaradorligini o'zgarishi 4-rasmda ko'rsatilgan. 4-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, nasadkaning qalinligini ortishi bilan haroratlar farqi va nisbiy namlik ortib borgan. Bunga sabab, nasadkaning qalinligini ortishi havo va suvning to'qnashish yuzasini oshirgan, natijada havoni nasadkada turish vaqti va bug'lanish jadalligi ortgan, shuningdek, haroratlar va namliklar farqi sezilarli ortgan. Biroq, nasadkaning qalinligi katta bo'lganda havo oqimi bosimining yo'qotilishi ham yuqori bo'ladi. Ushbu omillar eng yaxshi unumdorlikka erishish uchun optimal qalinlikni tanlashda aniqlovchi omillar bo'lib xizmat qiladi. 4-rasmda namlanuvchanlik va nasadka qalinligi turlicha bo'lganda to'yinganlik samaradorligini o'zgarishi ham ko'rsatilgan. Qalinlikni ortishi bilan samaradorlik ortgan, biroq 3 xil namlanuvchanlikli nasadkalar o'rtasidagi farq yana kamaygan. Juda katta qalinlik bosim yo'qotilishini oshiradi, chiqishdagi tezlik pasayadi va ventilyatorning energiya iste'moli ortadi.



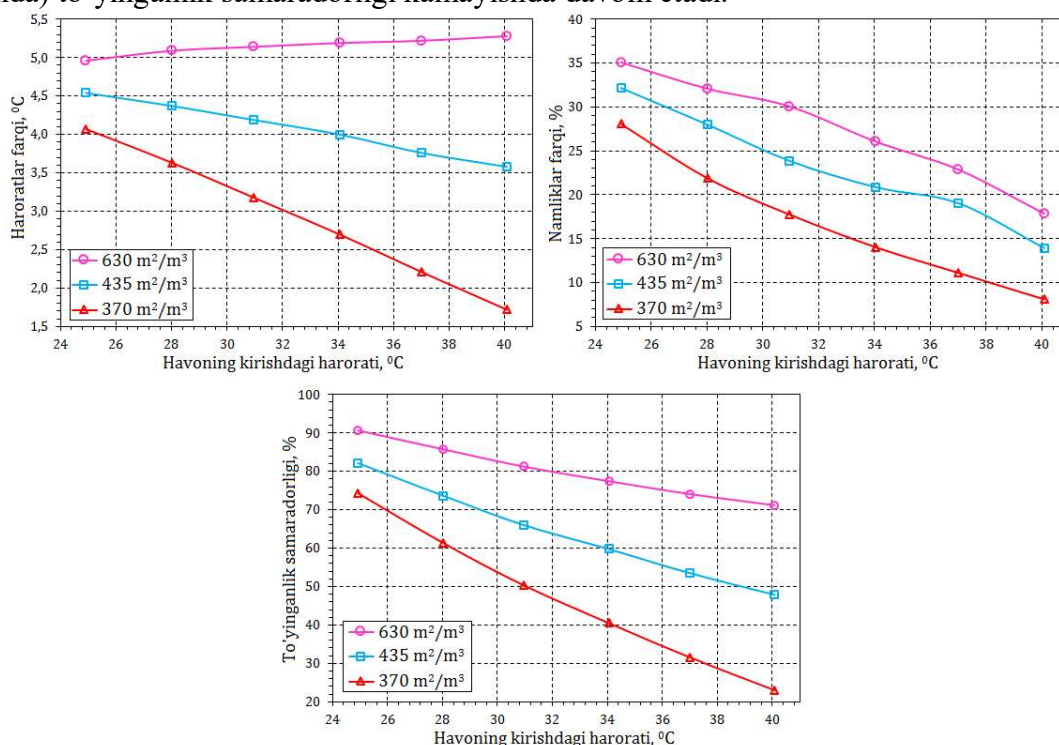
4-rasm. Nasadka qalinligi turlicha bo'lganda ishchi parametrlarning o'zgarishi natijalari



Fig. 4. Results of changes in operating parameters when the thickness of the insert varies

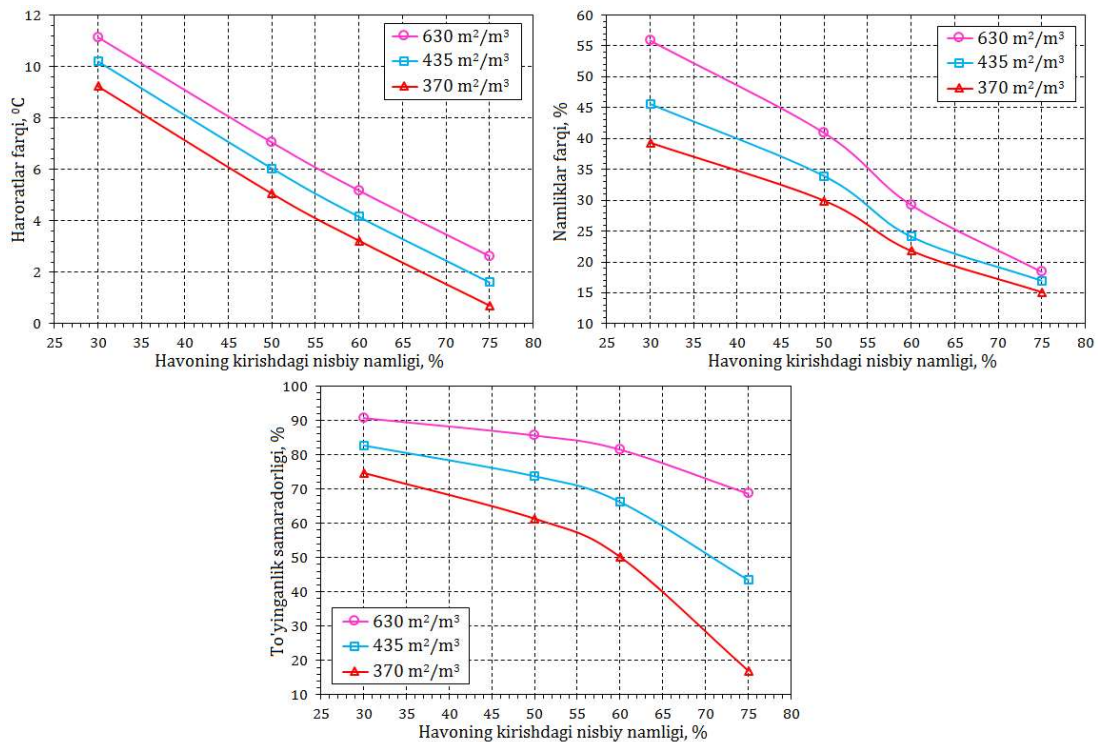
Nasadkaning qalinligi 0,15 m bo‘lganda haroratlar farqi namlanuvchanligi $630 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bo‘lgan nasadkada, namlanuvchanligi $370 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bo‘lgan nasadkaga qaraganda 62,25% ga yuqori bo‘lgan. Nasadkaning qalinligi 0,3 m gacha ortganda ularning farqi 17,37% ni tashkil etgan. Xuddi shunday to‘yinganlik samaradorligi namlanuvchanligi $370 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bo‘lgan nasadkaga nisbatan 60,51% ga yuqori bo‘lgan, nasadka qalinligi 0,3 m gacha ortganda ushbu farq 18,37% gacha pasaygan.

Ma‘lumki, iqlim sharoiti turli joylarda turlicha bo‘lib, u yilning mavsumiga bog‘liq holda o‘zgaradi. Chunki BSTning unumdorligi tashqi muhit sharoitiga sezilarli bog‘liq. Tabiiyki, turli iqlim sharoitlarida unumdorlikni tadqiqot qilishda havoning kirishdagi harorati sezilarli rol o‘ynaydi. Ushbu tadqiqot ishida havoning kirishdagi harorati turlicha bo‘lganda modellashtirish amalga oshirilgan bo‘lib, havoning nisbiy namligi 60%, havoning tezligi 3,0 m/s, nasadka qalinligi 0,15 m va namlanuvchanlikning uch xil qiymati qabul qilingan. Olingan natijalar 5-rasmda ko‘rsatilgan. 5-rasmda keltirilgan natijalarga ko‘ra, havoning kirishdagi harorati o‘zgarganda chiqishdagi harorati ham sezilarli o‘zgargan. Ushbu farqni hisobiga chiqishdagi harorat kamaygan. Shuningdek, nasadkaning namlanuvchanlik qiymati harorat o‘zgarishi bilan o‘zgargan. Namlanuvchanlik qiymati qancha kichik bo‘lsa, haroratlar farqi shuncha tez pasaygan. Namlanuvchanlik qiymati $630 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bo‘lganda deyarli to‘g‘ri chiziq hosil bo‘lgan. Biroq haroratlar farqi qolgan ikkita namlanuvchanlik qiymatiga qaraganda yuqori. Bu namlanuvchanlik qiymati yuqori bo‘lgandagi afzallikni bildiradi. Bundan tashqari, haroratni kirishdagi qiymatini ortishi bilan nisbiy namlikni chiqishdagi qiymati kamayib boradi. Kirishdagi haroratni o‘ta yuqori bo‘lishi, namlanuvchanlik qobiliyatini kamaytiradi, natijada bug‘lanayotgan suv miqdori ham kamayadi. Bu nisbiy namlikni chiqishdagi qiymatini sezilarli kamayishi bilan namoyon bo‘ladi. Shuningdek, rasmda turli holatlar uchun to‘yinganlik samaradorligining o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Kirishdagi haroratni ortishi bilan to‘yinganlik samaradorligi ortadi. Haroratlar farqi kamayganda namliklar farqi ortadi, kirishdagi haroratni ortishi bilan (kirishdagi nisbiy namlik o‘zgarmas bo‘lganda) to‘yinganlik samaradorligi kamayishda davom etadi.



5-rasm. Havoning kirishdagi harorati turlicha bo‘lganda ishchi parametrlarning o‘zgarishi natijalari

Fig. 5. Results of changes in operating parameters when the inlet air temperature varies



6-rasm. Havoning kirishdagi nisbiy namligi turlicha bo'lganda ishchi parametrlarning o'zgarishi natijalari

Fig. 6. Results of changes in operating parameters when the relative humidity of the air at the inlet varies

Natijalarga ko'ra, kirishdagi harorat 24 dan 40°C gacha ortganda namlanuvchanligi 630 m^2/m^3 bo'lgan konfiguratsiya uchun namliklar farqi va to'yinganlik samaradorligi mos ravishda 17,23% va 19,48% ga kamaygan. Kirishdagi harorat eng past 25°C bo'lganda, namlanuvchanligi 630 m^2/m^3 bo'lgan nasadka uchun haroratlar farqi, namliklar farqi va to'yinganlik samaradorligi namlanuvchanligi 370 m^2/m^3 bo'lgan nasadkaga qaraganda mos ravishda 21,87%, 25,01% va 21,98% ga yuqori ekanligi aniqlandi. BSTning ishlash samaradorligiga havoning kirishdagi nisbiy namligi ham sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Havoning nisbiy namligi tashqi muhit haroratiga va geografik holatga bog'liq. Nazariy tadqiqotlarda havoning kirishdagi nisbiy namligi 30 dan 75% gacha o'zgartirildi va olingan natijalar 6-rasmda ko'rsatilgan.

Yuqoridagi 6-rasmda keltirilgan natijalardan ko'rinib turibdiki, havoning kirishdagi nisbiy namligi qancha kichik bo'lsa, BSTning unumdorligi shuncha yuqori bo'ladi. Buning sababi, nasadka yuzasidan ko'p miqdorda namlik bug'lanadi va havoning chiqishdagi harorati sezilarli pasayadi. Bu holat namlanuvchanlikning barcha qiymatlari uchun ham bir xil bo'ladi. Havoning kirishdagi nisbiy namligini ortishi bilan BSTning unumdorligi kamayadi, bu namlanish tezligi, nisbiy namlik va haroratlar farqini kamayishiga olib keladi. Nasadkaning suv bilan ta'sirlashuvchi yuzasi maydonini ortishi hisobiga namlanuvchanlikning eng yuqori qiymatlarida suvning bug'lanishi, haroratlar farqi va nisbiy namlik qiymati ortadi. Havoning kirishdagi nisbiy namligi 30 dan 75% gacha ortganda, namlanuvchanligi 370, 475 va 630 m^2/m^3 bo'lgan nasadka uchun haroratlar farqi mos ravishda 92,31%, 84,22% va 76,39% ga kamayadi. Namliklar farqi esa mos ravishda 61,54%, 62,77% va 67,07% ga kamayadi. Shuningdek, to'yinganlik samaradorligi mos ravishda 77,21%, 47,48% va 24,31% ga kamayadi. Natijalarning umumiy tahlili shuni ko'rsatadiki, quruq iqlim sharoitida havoning kirishdagi harorati eng past bo'lganda BSTning unumdorligi eng yuqori bo'ladi.

Xulosa

Havoni bevosita BSTning prinsipial sxemasi hamda BSTda issiqlik va massa almashinuv jarayonlarini nazariy tadqiqot qilish imkonini beradigan energiya balansi tenglamalari asosidagi matematik model ishlab chiqildi va sonli tadqiqot qilindi.



BSTning sonli tadqiqotlarida tashqi havoning kirishdagi tezligi, harorati va namligi, shuningdek, nasadkaning qalinligini BSTning samaradorligiga ta'siri o'rganildi, natijalarga ko'ra, quruq iqlim sharoitida havoning kirishdagi harorati, tezligi va namligi minimal bo'lganda BSTning samaradorligi eng yuqori bo'lishi aniqlandi.

Adabiyotlar

- [1] Amer O., Boukhanouf R., Ibrahim H. A review of evaporative cooling technologies, *Int. J. Environ. Sci. Develop.* 6 (2), 2015. – p. 111-117.
- [2] Duan Z. Indirect evaporative cooling: past, present and future potentials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2012. – p. 6823-6850.
- [3] Xuan Y., Xiao F., Niu X., Huang X., Wang S. Research and application of evaporative cooling in China: a review (I)–research, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16 (5), 2012. – p. 3535-3546.
- [4] Uzair S. at all. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 122, 2021:105140.
- [5] Noor S., Ashraf H., Sultan M., Khan Z.M. Evaporative cooling options for building air-conditioning: a comprehensive study for climatic conditions of Multan (Pakistan), *Energies* 13 (12), 2020:3061.
- [6] Kabeel A.E., Hamed M.H., Omara Z.M., Sharshir S.W. “Experimental Study of a Humidification-Dehumidification Solar Technique by Natural and Forced Air Circulation.” *Energy* 68, 2014. – p. 218-228.
- [7] Zhani K., Bacha H.B., Damak T. “Modeling and Experimental Validation of a Humidification–Dehumidification Desalination Unit Solar Part.” *Energy* 36 (5), 2011. – p. 3159-3169.
- [8] Li Y., Huang X., Peng H., Ling X., Tu S. “Simulation and Optimization of Humidification-Dehumidification ES.” *Energy* 145, 2018. – p. 128-140.
- [9] Fisenko S.P., Petruchik A.I. “Toward to the Control System of Mechanical Draft Cooling Tower of Film Type.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (1), 2005. – p. 31-35.
- [10] Rafique M.M., Gandhidasan P., Rehman S., AlHadhrami L.M. “A Review on Desiccant Based Evaporative Cooling Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 2015. – p. 145-159.
- [11] Dhamneya A.K., Rajput S.P.S., Singh A. “Thermodynamic Performance Analysis of Direct Evaporative Cooling System for Increased Heat and Mass Transfer Area.” *Ain Shams Engineering Journal* 9 (4), 2018. – p. 2951-2960.
- [12] Malli A., Seyf H.R., Layeghi M., Sharifian S., Behravesh H. “Investigating the Performance of Cellulosic Evaporative Cooling Pads.” *Energy Conversion and Management* 52 (7), 2011. – p. 2598-2603.
- [13] Ghalavand Y., Rahimi A., Hatamipour M.S. “Mathematical Modeling for Humidifier Performance in a Compression Desalination System: Insulation Effects.” *Desalination* 433, 2018. – p. 48-55.
- [14] Eslamimanesh A., Hatamipour M.S. “Mathematical Modeling of a Direct Contact Humidification–Dehumidification Desalination Process.” *Desalination* 237 (1-3), 2009. – p. 296-304.
- [15] Wu J.M., Huang X., Zhang H. 2009b. “Theoretical Analysis on Heat and Mass Transfer in a Direct Evaporative Cooler.” *Applied Thermal Engineering* 29 (5-6), 2009. – p. 980-984.
- [16] Fouda A., Melikyan Z. “A Simplified Model for Analysis of Heat and Mass Transfer in a Direct Evaporative Cooler.” *Applied Thermal Engineering* 31 (5), 2011. – p. 932-936.