



PARABOLOTSILINDRIK KONSENTRATORLI KOLLEKTORLARDA ISSIQLIK TASHUVCHI OQIM GIDRODINAMIKASINI MATEMATIK MODELI NATIJALARINI QAYTA ISHLASH

dots. S.M. Xujakulov, dots. T.A. Fayziyev, B.G'. SHERqulov, S.U. Mirzayorova
Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, "Issiqlik energetikasi" kafedrası

Annotatsiya. Maqolada quyosh parabolotsilindrik konsentratorlarining nur qabul qilish sirtlari va absorberi orasida issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarini modellashtirish hisoblarida ishlatish uchun uchta keng tarqalgan diskretlashtirish yondashuvlari - cheklangan hajm usuli, chekli elementlar usuli va chekli farq usullari taqqoslangan hamda konsentrator absorber trubasining tashqi yuzasi bo'ylab issiqlik oqimining taqsimlanishi OpenFOAM dasturi vositasida Monte-Karlo usulida modellashtirilib natijalar olingan.

Kalit so'zlar: matematik modellashtirish, quyosh energiyasi, konsentratsiya, quyosh parabolotsilindrik konsentratori, Frenel linzalari, chegara shartlari, turbulent oqim.

Abstract. The article compares three common discretization approaches - finite volume method, finite element method and finite difference method - for use in modeling calculations of heat transfer processes between the light receiving surfaces of solar parabolocylindrical concentrators and the absorber, and the distribution of heat flow along the outer surface of the concentrator absorber tube using Monte Carlo software OpenFOAM results were obtained by modeling the method.

Key words: mathematical modeling, solar energy, concentration, solar parabolocylindrical concentrator, Fresnel lens, boundary conditions, turbulent flow.

Kirish. Bugungi kunning dolzarb muammosi, global isish muammosi hisoblanadi, global isish ta'sirida kelib chiqadigan oqibatlar – ob-havoning o'zgarishi, dengiz sathining ko'tarilishi va xalq iste'mol tovarlarini yetishtirish imkoniyatining buzilishini o'z ichiga oladi [1-4]. Global isish muammosini hal qilish maqsadida atmosferaga tarqaladigan CO₂ chiqindilari miqdorini kamaytirish uchun toza, qayta tiklanadigan va barqaror energiya manbalarini aniqlash talab etiladi. Quyosh issiqlik energiyasi organik yoqilg'ilarga bo'lgan qaramlikni kamaytirish, issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytirish va aholining elektr energiyasi, issiq suv ta'minoti tizimlari va boshqa sanoat ehtiyojlarini qondirishning samarali yechimlaridan biri hisoblanadi.

Quyosh energiyasini konsentratsiyalash (QEK) qurilmalari, xususan, to'g'ridan-to'g'ri normal nurlanish oqimlaridan foydalanishga tayanadi, konsentratsiyalangan quyosh nurlanish energiyasi normal sirt birligidan olingan quyosh energiyasi miqdori sifatida tavsiflanadi. Quyosh nurlanish oqimi energiyasini yig'ish usuliga qarab QEK qurilmalarini to'rtta asosiy guruhga ajratish mumkin: 1) parabolotsilindrik kollektorlar (PSK), 2) chiziqli Frenel reflektorlari, 3) paraboloid konsentratorlar va 4) quyosh minoralari [5,6,7].

Tadqiqot jarayonining maqsadi va metodologiyasi. Tadqiqotning asosiy maqsadi sonli modellashtirish yordamida parabolotsilindrik konsentratori kollektorda issiqlik energiyasidan foydalanish, issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish, FIKni oshirish kabi issiqlik tavsifnomalarini yaxshilashga erishishdan iborat.

Joriy ishda Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) deb nomlangan ochiq manbali hisobiy suyuqliklar dinamikasi dasturidan foydalanilgan. Ushbu dasturiy ta'minot fizikaviy xususiyatlar va aniq masalalarni turli yechimlarini tanlash imkoniyatini saqlagan holda C++ tilida yozilgan. Dastur universal usulda amalga oshiriladigan tadqiqot uchun tanlangan, chunki u to'liq ochiq tuzilishga ega. Shunday qilib, u issiqlik fizikaviy xususiyatlar, sxemalar, chegara shartlari va diskretlash usullari kabi barcha masalalarni takomillashtirishga imkon beradi. Ushbu usuldan qattiq yoki suyuq qatlamlar uchun hech qanday cheklovlarsiz mos keluvchi masalalarda oqim tavsifnomalarini va issiqlik almashinish jarayonini modellashtirish uchun foydalanish mumkin.



Oqimning turbulentlik tartibini modellashtirish asoslari. Suyuqlik oqimlarini oqim xususiyatlariga ko'ra uchta asosiy- laminar oqim, o'tish oqimi va turbulent oqim turiga bo'lish mumkin. Turbulent oqim sanoat va muhandislik masalalarida hisoblanadigan suyuqlik oqimlariga xos oqim turi hisoblanadi. Masalan, uchuvchi apparatlar atrofidagi oqim turbulent, yonish jarayonlarining aksariyati yuqori turbulentlik holatida amalga oshadi, quvurlar ichidagi tabiiy gaz va neft oqimi turbulentlik holatida, kemalar va suv osti kemalarining harakatlantiruvchi qismidagi oqim turbulent, okean ostidagi suv oqimi yuzalari turbulent harakatdanadi, mo'ridan chiqayotgan tutun oqimi turbulent va hokazo. Ko'rinib turibdiki, laminar oqimlar cheklangan parametrlar doirasida amalga oshishi bilan bir paytda, turbulentlik hisobiy suyuqliklar dinamikasining keng doirasini qamrab oladigan ilmiy masalalardan biri hisoblanadi. Energiya uzatish imkoniyatlari turbulentlik bilan kuchayadi va bu amaliy masalalarda turbulent oqimlarning dolzarbligini ifodalaydi [8,9,10].

Oqimning turbulentlik xususiyatlari. Turbulentlik suyuqlikka emas, balki uning oqim tavsifiga aloqador xususiyatdir. Turbulentlik xususiyatiga ega oqimlar suyuqliklar dinamikasida aniq ta'rifga yoki turbulentlik tabiati bilan bog'liq muammolar sababli umumiy nazariyaga ega emas [11].

Siljish kuchlanishini uzatish (SKU) uchun $k-\omega$ modeli. Menter (1994) tomonidan taklif qilingan ushbu model ham turbulent qovushqoqlik modeli hisoblanadi, shuningdek, ikkita qo'shimcha uzatish tenglamalariga asoslangan. Ulardan birinchisi turbulent kinetik energiya k uchun, ikkinchisi esa solishtirma tarqalish tezligi ω uchun. $k-\omega$ model devordan uzoqda aralashish funksiyasiga asosan devor yaqinidagi kichik qiymatli Re soniga ko'ra $k-\varepsilon$ modeliga o'tadi. Modelni hisoblash jarayonida kichik o'zgarish bilan $k-\omega$ standart modelida qo'llanilgan k -tenglama bilan bir xilda, bu yerda ε hisoblanadigan k va ω larning hosilasi bo'lib hisoblanadi. Turbulentlik modelini devorga yaqin sohadan erkin oqim sohasiga tadbiiq etish, modelni solishtirma tezlik ω tenglamasidan, ekvivalent tezlik tarqalishi ε tenglamasiga o'tkazish uchun ishlatiladigan aralashirish funksiyasi yordamida amalga oshiriladi. SKU modeli devor yaqinidagi oqimning turbulentlik xususiyatlarini yaxshilash uchun devor xususiyatlarini tavsiflashni talab qilmaydi. Turbulent kinetik energiya va uning o'ziga xos energiya tarqalish tezligi uchun uzatish tenglamalari quyidagicha yoziladi [8]:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \beta^* k \omega \quad (1)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{v_t} \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \omega^2 \beta \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2)$$

(2)-tenglamaning oxirgi hadi model konstantalarini quyidagi tarzda interpolatsiya qilish uchun aralashirish funksiyasidan foydalanadi:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2 \\ \gamma &= F_1 \gamma_1 + (1 - F_1) \gamma_2 \\ \sigma_k &= F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \\ \sigma_\omega &= F_1 \sigma_{\omega 1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Modelga tegishli barcha o'zgarish kattaliklar 4-jadvalga kiritilgan. F_1 aralashirish funksiyasi oqim maydoni markaziy nuqtasidan eng yaqin devor sirtigacha bo'lgan y masofaga va $CD_{k\omega}$ tezkor diffuziya kattaligining qiymatiga qarab quyidagicha ifodalanadi:

$$F_1 = \tanh \left[\min \left\{ \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega \gamma}, \frac{500 v}{d^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} \gamma^2} \right\} \right]^4 \quad (4)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (5)$$

F_1 aralashirish funksiyasi qattiq devordan harakatdagi oqimga tomon yo'nalganda birga, devorga tomon yaqinlashganda esa nolga intiladi. Uni matematik ifodada quyidagicha yozish mumkin:

$$F_1 = \begin{cases} \rightarrow 0, & \text{devorga yetib, o'zini } k - \omega \text{ model kabi tutadi} \\ \rightarrow 1, & \text{devordan uzoqda, o'zini } k - \varepsilon \text{ model kabi tutadi} \end{cases} \quad (6)$$





Modeldagi uyurmaviy harakatlanuvchi oqim qovushqoqligi, Reynoldsning siljish kuchlanishi turbulent kinetik energiyaga proporsional ravishda bog‘liq degan farazga asoslanib, quyidagicha aniqlanadi:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (7)$$

Ushbu faraz uyurma hosil qilish muddatining tarqalish davridan oshib ketishiga yo‘l qo‘ymaslik orqali turbulent qovushqoqlikni cheklaydi. F_2 va Ω parametrlari aralashish funksiyasini va uyurmaviy oqimning mutlaq qiymati kattaligini ifodalaydi va quyidagicha aniqlanadi:

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega \gamma}, \frac{500 v}{d^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (8)$$

$$\Omega = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

Bu yerda

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

F_2 aralashtirish funksiyasi erkin oqim qatlamlari uchun va chegaraviy qatlamlarga yo‘nalgan oqimlar uchun nolga teng. U ω hosilani hisobga olgan holda quyidagicha ifodalanadi:

$$P_\omega = \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

Bu yerda

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (12)$$

1-jadval. SKU k- ω modelining konstantalari.

a_1	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$	β^*	β_1	β_2	σ_{k1}	σ_{k2}	γ_1	γ_2
0.31	0.5	0.856	0.09	0.075	0.0828	0.85	1.0	5/9	0.44

Natijalarni qayta ishlash.

Aniqlangan va Navye-Stoks tenglamalariga bo‘ysunuvchi oqimlarni turbulent oqimlar uchun mavjud analitik usullar bilan yechishning imkoni yo‘q. Biroq, bu tenglamalardan foydalanib kerakli aniqlikdagi iterativ usulda hisoblash uchun sonli usullardan foydalanish mumkin. Hisobiy suyuqliklar dinamikasi hisoblarida ishlatish uchun uchta keng tarqalgan diskretlashtirish yondashuvlari mavjud bo‘lib, ular quyidagilar: cheklangan hajm usuli (CHHU) (taxminan 80 % ulush bilan), chekli elementlar usuli (CHEU) (taxminan 15 % ulush bilan) va chekli farq usuli (CHFU) (taxminan 2 % ulush bilan). Mavjud hisobiy suyuqliklar dinamikasi hisoblarining qolgan 3% qismi chegara elementi usuli, spektral usul, panjara Bolsmann usuli va Vorticiti usuli kabi turli yondashuvlarga tayanadi [9].

CHFU taxminiy qiymati qisman differensial tenglamalarni hisoblashda Teylor seriyasining kengayishiga asoslanadi va bu usulning aniqligi to‘plangan to‘r panjarasi o‘lchamiga va uning qiyshilik, cho‘zilish hamda tomonlar nisbatlari kabi panjara xususiyatlariga bog‘liq. Darhaqiqat, to‘rdagi kesishish nuqtalari sonini oshirish prognozlashning aniqligi ortishiga olib keladi; ammo, algebraik tenglamalarda matritsaning noaniqligi tufayli hisoblash jarayonida qiyinchiliklar yuzaga keladi. Boshqa tomondan, CHHU da qo‘llanilgan differensial tenglamalar oqim sohasining bir-biriga mos kelmaydigan kichik hajmlari bo‘yicha diskret algebraik tenglamalarga aylantiriladi. Keyinchalik, bir-biriga bog‘liq o‘zgaruvchilarning qiymatlarini hisoblash uchun har bir nazorat hajmiga tegishli algebraik tenglamalar yechiladi. CHHU bilan solishtirganda, odatda hisobiy suyuqliklar dinamikasi muammolariga nisbatan CHEU ni qo‘llash maqsadga muvofiq bo‘ladi. Biroq, CHEU an’anaviy usul hisoblansa, CHHU hisobiy suyuqliklar dinamikasida nisbatan yangiroq qo‘llaniladigan usul hisoblanadi, chunki suyuqlik oqimlarida kuzatiladigan murakkab geometrik muammolari uchun differensial tenglamalarni yechishning eng yaxshi alternativ usuli sifatida taklif qilingan. CHHU suyuqlik oqimi va issiqlik uzatishning sonli modellashtirilishi uchun juda mos keladigan turli xususiyatlar orasida, massa va impuls qonunlariga CHHUda qat’iy amal qilinadi, chunki har qanday oqim ma’lum bir nazorat hajmiga kiradi [10].

Chegara shartlari

Sonli hisoblash usullarida qo‘llaniladigan chegara shartlari quyida keltirilgan:

-Dirixlet chegara shartlari: chegara qiymatlari ko‘rsatilgan.

-Neyman chegara shartlari: chegaraga perpendikulyar o‘zgaruvchan gradiyent ko‘rsatilgan.

-Robin chegara shartlari: chegara o‘zgaruvchining qiymati va uning hosilasi kombinatsiyasi talab qilinadi.

Ushbu modellashtirish jarayonida talab qildinadigan chegara shartlarining tafsilotlari quyida keltirilgan:

1. Kirish chegarasida turbulentlikning kinetik energiya va issiqlik tashuvchi suyuqlikning miqdori hamda issiqlik fizikaviy xususiyatlariga asoslangan o‘ziga xos tarqalish tezligi kabi turbulentlik oqim xususiyatlari bilan bir qatorda bir xil harorat va qat’iy tezlik qiymatlari qo‘llaniladi. Biroq, bosim nol gradiyent chegara sharti sifatida tanlanadi.

2. Chiqish chegarasida oqim to‘liq rivojlangan deb hisoblanadi. Shuning uchun, tezlik va harorat nol gradiyent sifatida tanlanadi, shuningdek, barcha turbulentlik xususiyatlari (o‘ziga xos tarqalish tezligi va turbulent kinetik energiya) bosim nol chegara sharti bilan belgilangan qiymatlarda qo‘llaniladi.

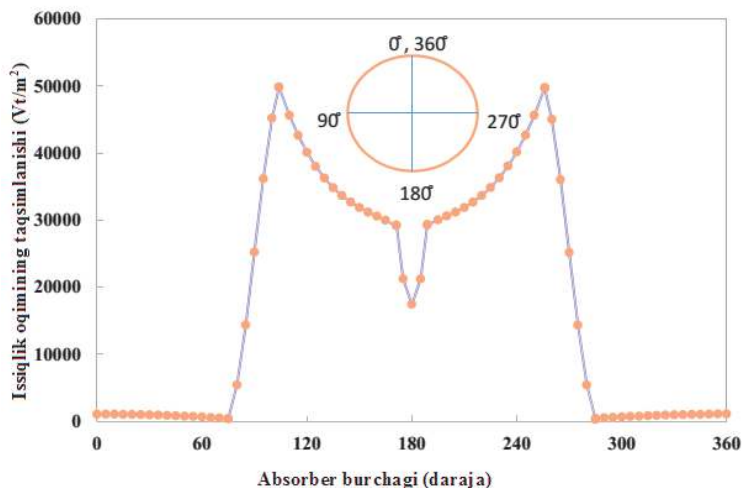
3. Qattiq devorlarda tezlik uchun sirpanmaslik sharti va turbulent kinetik energiya uchun 0ga teng bo‘lgan o‘zgarma qiymat qo‘llaniladi, Menter tomonidan tavsiya etilganidek, turbulentlikning o‘ziga xos tarqalish tezligi uchun juda katta o‘zgarma qiymat talab qilinadi. Nur qaytargich va nur yutuvchi qattiq devor orasidagi masofaga asoslangan quyidagi ifodaga ko‘ra issiqlik tashuvchining zichligi va dinamik yopishqoqligi, o‘ziga xos turbulentlik tarqalish tezligi quyidagicha ifodalanadi [11]:

$$\omega = \frac{60 \cdot \mu}{0,075 \cdot \rho \cdot y^2} \quad (13)$$

4. Absorber trubasining tashqi devoridagi chegara holati 3.1-rasmda aniq ko‘rsatilgandek bir xil bo‘lmagan issiqlik oqimidir. Ushbu profilga Kaloudis va boshqalar tomonidan taklif qilingan egri chiziqli tenglamalar yordamida erishiladi. Monte-Karlo Rey kuzatuv usulining natijasidir. Bu tenglamalar 2-jadvalda keltirilgan [10-15].

2-jadval: Mahalliy konsentratsiya koeffitsiyentlarining nisbati [8]

Qism	Ø diapazon (daraja.)	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
1	0-75	0.0	-1.071170E-4	-8.100954E-4	1.112046
2	75-104	-2.544403E-3	6.878607E-1	-5.974390E1	1.685403E3
3	104-171.2	-6.602394E-5	3.196692E-2	-5.280388	3.275329E2
4	171.2-188.8	0.0	1.524597E-1	-5.488588E1	4.957224E3
5	188.8-256	5.961826E-5	-3.504845E-2	6.979938	-4.403785E2
6	256-285	2.493475E-3	-2.019052	5.427366E2	-4.840387E4
7	285-360	0.0	-7.511141E-5	2.688045E-2	-9.606886



1-rasm: Absorber trubasining tashqi yuzasi bo‘ylab issiqlik oqimining taqsimlanishi.



Joriy tadqiqotda raqamli kodlash dasturi (OpenFOAM) dan foydalanilganligi sababli, chegara shartlarini belgilashda aralash kodlashga (codedMixed) asoslanildi. Bunda chegara shartlari Neyman chegara holatini ifodalaydi va issiqlik o'tkazuvchanligiga qarab harorat gradiyenti mustaqil o'zgaruvchi sifatida ifodalanishi mumkin:

$$q = -k_s \cdot \frac{dT}{dz} \text{ yoki } \frac{dT}{dz} = -\left(\frac{G_b}{k_s}\right) \cdot LCR \quad (14)$$

bu yerda G_b , k_s va LCR parametrlari mos ravishda quyosh nurlanish radiatsiyasi, absorber qattiq materialining issiqlik o'tkazuvchanligi va mahalliy konsentratsiya koeffitsiyentlarining nisbati. Mahalliy konsentratsiya koeffitsiyentlarining nisbati absorber trubkasi atrofidagi issiqlik oqimining taqsimlanishini ifodalaydi.

Xulosa. Amalga oshirilayotgan tadqiqot ishlarimizda asosiy e'tibor quyosh nurlanish oqimini parabolotsilindrik konsentrator absorberining sirtiga yo'naltirilishi va harorat gradiyentini aniqlashga qaratilgan. Taqdim etilgan natijalar Monte-Karlo usuliga asosan modellashirish natijalari hisoblanadi.

ADABIYOTLAR

1. Toshmamatov B.M., Shomuratova S.M., Mamedova D.N., Samatova S.H.Y., Chorjeva S. 2022 Improving the energy efficiency of a solar air heater with a heat exchanger – Accumulator. 1045(1), 012081.
2. G N Uzakov, S M Shomuratova and B M Toshmamatov 2021 Study of a solar air heater with a heat exchanger – accumulator *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 723 (2021) 052013. doi:10.1088/1755-1315/723/5/052013.
3. T A Faiziev and B M Toshmamatov 2021 Mathematical model of heat accumulation in the substrate and ground of a heliogreenhouse *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 723 032006. doi:10.1088/1755-1315/723/3/032006.
4. Aliyarova L A, Uzakov G N, Toshmamatov B M 2021 The efficiency of using a combined solar plant for the heat and humidity treatment of air *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 723 052002. doi:10.1088/1755-1315/723/5/052002.
5. Blanco M.J., and Miller S. Introduction to Concentrating Solar Thermal (CST) Technologies. *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. Elsevier Inc, (2017).
6. Abed, N. & Afgan, I. Enhancement Techniques of Parabolic Trough Collectors: A Review of Past and Recent Technologies. *Adv. Civ. Eng. Tech.* (2019), 33, 313–318.
7. Philibert C, Frankl P. International Energy Agency. Technology roadmap: concentrating solar power. Paris (France): IEA/OECD; (2010).
8. Tennekes, Hendrik, and John L. Lumley. "A first course in turbulence". (1994). Cambridge: The MIT Press.
9. Mathieu, Jean, and Julian Scott. "An introduction to turbulent flow". (2000). Cambridge: Cambridge University Press.
10. Pope, Stephen B. "Turbulent flows". (2019). Cambridge: Cambridge University Press.
11. Schiestel, Roland. "Modeling and Simulation of Turbulent Flows". (2010). <https://nbnresolving.org/urn:nbn:de:101:1-201412222763>.
12. Menter, F.R. —Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8). (1994). pp.1598–1605.
13. Petrova, R. "Finite Volume Method – Powerful Means of Engineering Design". (2012). Edited by Radostina Petrova. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.
14. Moukalled, F., L. Mangani, and M. Darwish. "The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab". (2016). Cham: Springer.
15. Kaloudis, E, E Papanicolaou, and V Belessiotis. "Numerical Simulations of a Parabolic Trough Solar Collector with Nanofluid Using a Two-Phase Model." *Renewable Energy*. 97 (2016): 218-229.