UO'K 621.311.243:536.24

SOVITISH MODULIDAGI ISSIQLIK ALMASHINUVINING SONLI MODELI VA TAJRIBA NATIJALARINI QIYOSIY TAHLIL QILISH

t.f.d., professor. **Sadullayev N.N,**
Buxoro davlat texnika universiteti
Dots. **Nematov Sh.N**
Buxoro davlat texnika universiteti
Soliyeva Z.N
Buxoro davlat texnika universiteti tayanch doktoranti
e-mail: soliyevazamira839@gmail.com

Qabul qilindi: 10.10.2026
Ko'rib chiqildi: 11.10.2026
Tasdiqlandi: 12.10.2026

Kalit so'zlar:
PV/T qurilma, COMSOL Multiphysics, sonli model, tajriba, termik qarshilik, tutashuv qatlami, energiya balansi.

Ключевые слова:
PV/T установка, COMSOL Multiphysics, численная модель, эксперимент, термическое сопротивление, контактный слой, энергетический баланс.

Keywords:
PV/T device, COMSOL Multiphysics, numerical model, experiment, thermal resistance, contact layer, energy balance.

Annotatsiya. Tezisda fotoelektrotermik qurilma sovitish modulining COMSOL Multiphysics 6.2 dasturidagi sonli hisob natijalari to'liq o'lchamli qurilmani tabiiy sharoitda sinash ma'lumotlari bilan solishtirilgan. Sonli model va tajriba sharoitlari bir-biridan sezilarli farq qilgani sababli taqqoslash energiya balansi va orqa yo'nalishdagi termik qarshiliklarni tarkibiy qismlarga ajratish orqali bajarildi. Sonli hisob issiqlik almashtirgichning o'zi kiritadigan qarshilik $3{,}4\cdot10^{-3}$ m²·K/W dan oshmasligini, tajriba esa orqa yo'nalishdagi umumiy qarshilik qariyb $65\cdot10^{-3}$ m²·K/W ekanini ko'rsatdi. Farqning asosiy qismi modul va almashtirgich orasidagi tutashuv qatlamiga to'g'ri kelishi, uni bartaraf etish esa suvning qizishini 1,75 baravargacha oshirishi mumkinligi aniqlandi.

Аннотация. В тезисе результаты численного расчёта охлаждающего модуля фотоэлектротепловой установки в программе COMSOL Multiphysics 6.2 сопоставлены с данными натурных испытаний полноразмерной установки. Поскольку условия численной модели и эксперимента существенно различаются, сравнение проведено через энергетический баланс и разделение термических сопротивлений тыльной стороны. Численный расчёт показал, что собственное сопротивление теплообменника не превышает $3{,}4\cdot10^{-3}$ м²·К/Вт, тогда как по эксперименту общее

сопротивление тыльной стороны составляет около $65 \cdot 10^{-3}$ м²·К/Вт. Установлено, что основная часть разницы приходится на контактный слой между модулем и теплообменником, устранение которого может увеличить нагрев воды до 1,75 раза.

Abstract. The thesis compares the results of a numerical simulation of the cooling module of a photovoltaic-thermal device in COMSOL Multiphysics 6.2 with field-test data of the full-size device. Since the conditions of the numerical model and the experiment differ considerably, the comparison was carried out through the energy balance and by separating the rear-side thermal resistances. The simulation showed that the heat exchanger itself adds no more than $3.4 \cdot 10^{-3}$ m²·K/W, whereas the experiment indicates a total rear-side resistance of about $65 \cdot 10^{-3}$ m²·K/W. Most of the difference lies in the contact layer between the module and the heat exchanger; eliminating it could increase water heating by up to 1.75 times.

Kirish

Fotoelektrotermik (PV/T) qurilmalarni loyihalashda sovitish kanallarining shakli va o‘lchamlari ko‘pincha sonli modellashtirish yordamida tanlanadi. Biroq sonli modelda qabul qilinadigan ideal sharoitlar — tekis taqsimlangan issiqlik oqimi, mukammal issiqlik kontakti, katta suv sarfi — real qurilmada to‘liq bajarilmaydi. Shu sababli sonli natijalarni tajriba bilan qiyoslash modelning qo‘llanish chegaralarini aniqlash va konstruksiyani takomillashtirish yo‘nalishlarini belgilash uchun zarur [1, 2]. Ushbu ishda S-simon kanalli sovitish modulining COMSOL natijalari Buxoro sharoitida sinalgan to‘liq o‘lchamli qurilma ma’lumotlari bilan solishtirildi.

Tadqiqot obyekti va usullari

Sonli tajribada modul orqa yuzasining oltidan bir qismini egallovchi bitta zona (382 × 292 mm) ko‘rib chiqildi. Zona 16 mm qalinlikdagi mis plastinadan va unga ochilgan eni 10–40 mm, chuqurligi 14 mm li to‘rtta qaytuvchi kanaldan iborat. Plastinaning ustki sirtiga 900 W/m² issiqlik oqimi qo‘yildi, har bir kanalga suv 0,01

m/s tezlik va 20 °C harorat bilan kiritildi. Masala laminar oqim va tutash issiqlik almashinuvi interfeyslari yordamida statsionar qo‘yilishda yechildi [3].

Tajriba obyekti — nominal quvvati 150 W, yuzasi 0,7308 m² bo‘lgan monokristall modul va uning orqasiga mahkamlangan olti zonali sovitish moduli. Sinovda suv sarfi 0,005 L/s, kirish harorati 29,5 °C bo‘lib, chiqishda suv harorati 40,6 °C ga yetdi. Haroratlar ±0,5 °C xatolikli termometrlar bilan, sarf esa hajmiy usulda (±3 %) o‘lchandi. Ikki holat sharoitlari 1-jadvalda taqqoslangan.

1-jadval

Sonli model va tajriba sharoitlari

Ko‘rsatkich	COMSOL modeli	Tajriba
Hisob/sinov obyekti	bitta zona, mis plastina	to‘liq modul (6 zona)
Issiqlik manbai	$q_0 = 900$ W/m² (berilgan)	quyosh nurlanishi
Suvning kirish harorati, °C	20	29,5
Suv sarfi, L/s	0,014 (bir zona)	0,005 (butun modul)
Solishtirma sarf, mL/(s·m²)	125,5	6,84
Reynolds soni	116–207	≈ 10–17
Modul qatlamlari va tutashuv qatlami	hisobga olinmagan	mavjud

Sharoitlar keskin farq qilgani uchun natijalarni bevosita solishtirish o‘rniga ular umumiy fizik ko‘rsatkichlarga keltirildi. Birinchidan, har ikki holatda suvning qizishi energiya balansi orqali solishtirma issiqlik oqimi va solishtirma sarf bilan bog‘landi [4]:

$$\Delta T_s = \frac{q_s}{\rho \cdot c_p \cdot v_A}, \quad v_A = \frac{V}{A} \tag{1}$$

bu yerda q_s — suvga o‘tgan solishtirma issiqlik oqimi, W/m²; v_A — modul yuzasi birligiga to‘g‘ri keladigan hajmiy sarf. Ikkinchidan, sonli hisobdagi isitilgan sirtning maksimal harorati asosida issiqlik almashtirgichning termik qarshiligi yuqoridan baholandi:

$$R_{alm} \leq \frac{T_{sirt,max} - T_{kir}}{q_0} \tag{2}$$

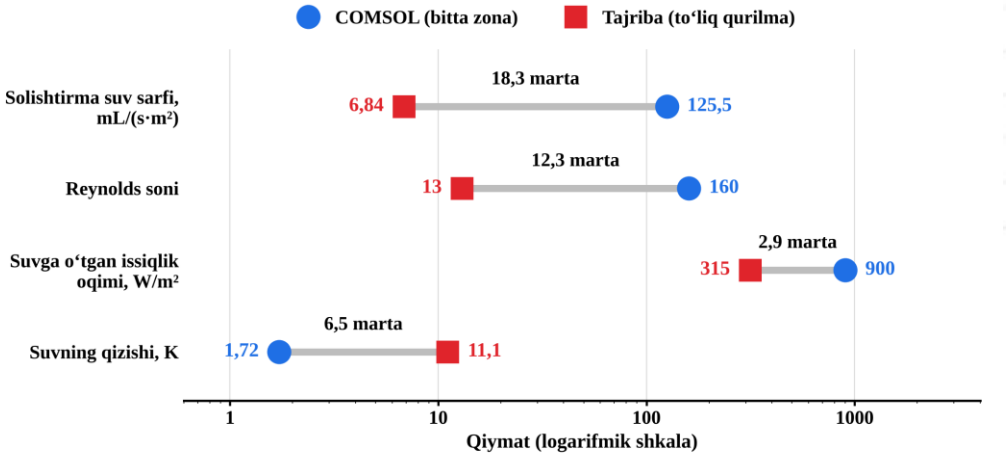
Uchinchidan, tajriba natijasiga moslashtirilgan analitik model [6] yordamida orqa yo‘nalishdagi umumiy qarshilik aniqlanib, u tarkibiy qismlarga ajratildi:

$$R_{orqa} = \frac{\delta_{EVA,o}}{\lambda_{EVA}} + \frac{\delta_{op}}{\lambda_{op}} + R_{alm} + R_k \tag{3}$$

bu yerda R_k — modul va almashtirgich orasidagi tutashuv qatlamining qarshiligi; u sonli modelda nolga teng deb olingan.

Natijalar va muhokama

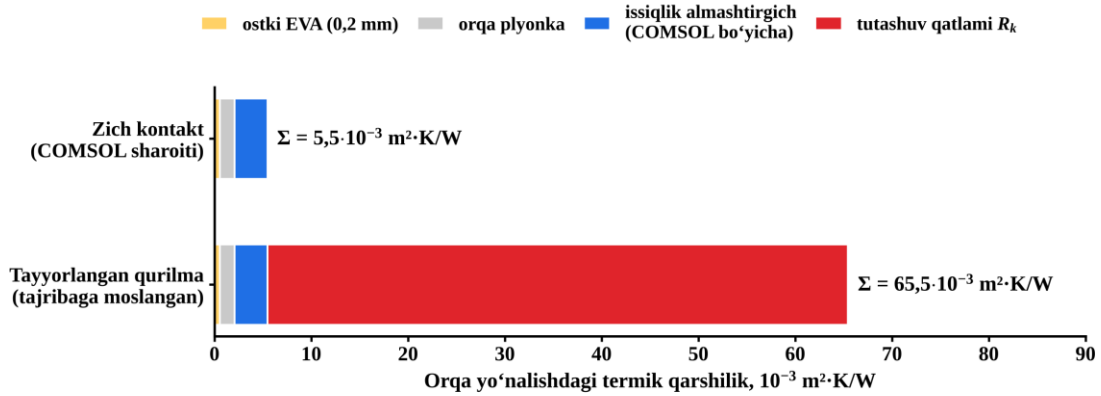
1-rasmda ikki holatning asosiy ko‘rsatkichlari logarifmik shkalada taqqoslangan. Tajribadagi solishtirma sarf sonli modeldagidan 18 baravar, Reynolds soni esa 12 baravar kichik, ammo har ikki holatda ham oqim laminar. Shu sababli tajribada suv 11,1 K ga qiziydi, sonli modelda esa bor-yo‘g‘i 1,72 K ga.



1-rasm. COMSOL modeli va tajribaning asosiy ko‘rsatkichlari

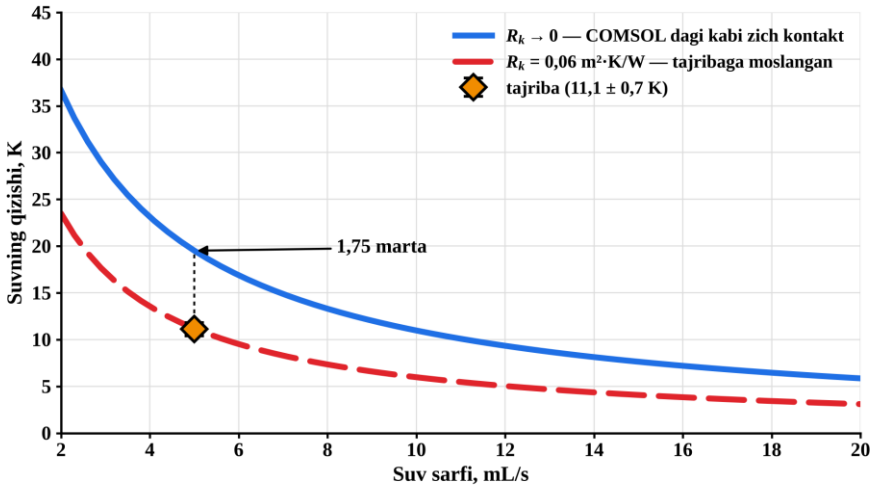
(1) ifoda ikkala natijaning ichki muvofiqligini tasdiqladi. Sonli modelda 900 W/m² oqim va 125,5 mL/(s·m²) sarfda energiya balansi 1,72 K qizishni beradi va bu COMSOL natijasi bilan to‘liq mos keladi. Tajribada o‘lchangan qizish esa 315 W/m² solishtirma issiqlik oqimiga, ya’ni taxminan 230 W foydali quvvatga mos keladi (noaniqligi ±7 %). Demak, tajribada suvga sonli modelda qabul qilingan oqimning uchdan biriga yaqini o‘tadi; G ≈ 900 W/m² da bu yutilgan nurlanishning taxminan 39 % iga teng.

Sonli hisobda isitilgan sirt harorati kirish haroratidan ko‘pi bilan 3,05 K ga oshgan; (2) ifoda bo‘yicha bu almashtirgich qarshiligi $3{,}4\cdot10^{-3}$ m²·K/W dan oshmasligini bildiradi. Bu qiymat analitik modelda qabul qilingan suv tomonidagi qarshilik $1/h_s = 3{,}3\cdot10^{-3}$ m²·K/W bilan deyarli bir xil, ya’ni sonli va analitik modellar bir-birini tasdiqlaydi. Ostki EVA va orqa plyonka qarshiliklari qo‘shilganda zich kontaktli holat uchun orqa yo‘nalishdagi umumiy qarshilik $5{,}5\cdot10^{-3}$ m²·K/W ni tashkil etadi (2-rasm). Tajriba natijasiga moslashtirilgan model esa bu qarshilik qariyb $65\cdot10^{-3}$ m²·K/W ekanini ko‘rsatdi. Ayirma — taxminan $60\cdot10^{-3}$ m²·K/W — tutashuv qatlamiga to‘g‘ri keladi va umumiy qarshilikning 92 % ini tashkil etadi.



2-rasm. Orqa yo'nalishdagi termik qarshilikning tarkibi: sonli model sharoiti va tayyorlangan qurilma

Tutashuv qatlamining amaliy ahamiyati 3-rasmda ko'rsatilgan. Tajriba sharoitida ($G = 900$ W/m², $T_a = 38$ °C, $T_{kir} = 29,5$ °C) analitik model $R_k \to 0$ bo'lganda, ya'ni COMSOL dagi kabi zich kontaktda, 0,005 L/s sarfda suvning 19,5 K ga qizishini bashorat qiladi — bu o'lchangan qiymatdan 1,75 baravar ko'p. $R_k = 0,06$ m²·K/W da esa model tajriba nuqtasidan o'tadi. Fotoelement harorati ham mos ravishda 42,5 °C va 55,9 °C ni tashkil etadi. Ikki egri chiziq orasidagi farq sarf ortgan sari qisqaradi: 20 mL/s da u 2,8 K gacha kamayadi, ya'ni kichik sarfli issiq suv rejimida tutashuv sifati ayniqsa muhim.



3-rasm. Turli tutashuv qarshiliklarida suv qizishining sarfga bog'liqligi va tajriba natijasi

Gidravlik jihatdan sonli model tajriba uchun qulay xulosa beradi: COMSOL da kanallardagi ishqalanish bosimi yo'qotilishi 0,45–2,12 Pa ni tashkil etgan. Laminar oqimda bosim yo'qotilishi tezlik va qovushqoqlikka proporsional bo'lgani uchun [5] tajribadagi kichik sarf va iliqroq suvda u 0,1 Pa dan kam bo'ladi. Bu qurilmani juda kichik quvvatli nasos yoki termosifon rejimida ishlatish mumkinligini ko'rsatadi. Sonli hisobda sirt bo'ylab harorat farqi ≈ 3 K ni tashkil etgan; tajribada sirt harorati maydoni o'lchanmagani sababli bu ko'rsatkichni

keyingi sinovlarda termografiya yordamida tekshirish rejalashtirilgan. Taqqoslash natijalari 2-jadvalda umumlashtirilgan.

2-jadval

Sonli model va tajriba natijalarini qiyoslash

Ko‘rsatkich	COMSOL	Tajriba	Izoh
Suvning qizishi, K	1,72	11,1 ± 0,7	ikkalasi energiya balansiga mos
Suvga o‘tgan issiqlik oqimi, W/m²	900 (berilgan)	315 ± 22	tajribada ≈ 39 % yutilgan nurlanish
Orqa yo‘nalish qarshiligi, 10^{-3} m²·K/W	≤ 5,5	≈ 65	92 % i — tutashuv qatlami
Bosim yo‘qotilishi, Pa	0,45–2,12	< 0,1 (baho)	oqim laminar
Sirt bo‘ylab harorat farqi, K	≈ 3	o‘lchanmagan	termografiya talab etiladi

Xulosa

1. COMSOL modeli va tajriba sharoitlari solishtirma sarf (18 baravar), Reynolds soni (12 baravar) va issiqlik oqimi bo‘yicha keskin farq qilgani uchun natijalarni energiya balansi va termik qarshiliklar orqali taqqoslash maqsadga muvofiq.

2. Sonli hisob issiqlik almashtirgichning qarshiligi $3{,}4 \cdot 10^{-3}$ m²·K/W dan oshmasligini ko‘rsatdi va analitik modeldagi suv tomonidagi qarshilik qiymatini tasdiqladi.

3. Tajriba asosida aniqlangan orqa yo‘nalish qarshiligi (≈ $65 \cdot 10^{-3}$ m²·K/W) sonli model sharoitidagidan 12 baravar katta bo‘lib, farqning 92 % i tutashuv qatlamiga to‘g‘ri keladi.

4. Tutashuv qatlamini bartaraf etish (issiqlik o‘tkazuvchi pasta, siqib mahkamlash) suvning qizishini 1,75 baravar oshirib, qurilma ko‘rsatkichlarini sonli model darajasiga yaqinlashtiradi. Keyingi bosqichda COMSOL modelini tajriba sharoitida (kirish harorati 30 °C, 6,8 mL/(s·m²), modul qatlamlari bilan) qayta hisoblash tavsiya etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Sadullaev N., Nematov Sh., Soliyeva Z., Nematova Z. A review of the prospects for implementing cooling technologies in the efficient use of photovoltaic modules in the climatic conditions of the Republic of Uzbekistan // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3331. – P. 050016. – DOI: 10.1063/5.0305902.

2. Rasool I.N., Abdullah R.S. Experimental study of PV panel performance using backside water cooling chamber // International Journal of Energy Production and Management. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P. 89–95. – DOI: 10.18280/ijepm.080205.
3. COMSOL Multiphysics® v. 6.2. Heat Transfer Module User's Guide. – Stockholm: COMSOL AB, 2023.
4. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 7th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
5. Shah R.K., London A.L. Laminar Flow Forced Convection in Ducts. – New York: Academic Press, 1978.
6. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.