ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME - 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME - 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

FAZA O‘ZGARUVCHAN VA QATTIQ MATERIALLARDAN BIRGALIKDA FOYDALANILGAN ISSIQLIK ENERGIYASINI SAQLASH TIZIMLARINING HISOBI

Shodmonov Musulmon Farxodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti 4-bosqich talabasi
E-mail: shmusulmon@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqola faza o‘zgaruvchan materiallar (FOM) va qattiq issiqlik akkumulyatorlarining birgalikdagi ishlash tamoyillariga asoslangan gibrid issiqlik energiyasini saqlash (IES) tizimlarini matematik va raqamli modellash usullarini taqdim etadi. Tizimda issiqlik o‘tkazuvchanligini oshirish uchun grafenli kompozit materiallar, metallik ko‘pikmalar va aniqli issiqlik kapasiteti katta bo‘lgan keramik qo‘shimchalar qo‘llanilib, entalpiya-temperatura munosabatlarini tavsiflovchi to‘liq termodinamik modellar ishlab chiqilgan. Stefan muammosi asosida qo‘llanilgan chegara shartlari bilan hal etilgan ikki fazali issiqlik o‘tkazuvchanligi tenglamalari tizimi natijalariga ko‘ra, gibrid tizimlar sof FOM tizimlariga nisbatan issiqlik to‘plash samaradorligini 23–41% ga oshirishi aniqlandi. Quyosh energiyasi tizimlari va sanoat jarayonlari uchun amaliy tavsiyalar berilgan.

Kalit so‘zlar: faza o‘zgaruvchan materiallar, qattiq issiqlik akkumulyatori, gibrid issiqlik saqlash, Stefan muammosi, entalpiya usuli, issiqlik o‘tkazuvchanlik, quyosh energiyasi, CFD modellash, termodinamika, issiqlik kapasiteti.

Аннотация. В данной статье представлены методы математического и численного моделирования гибридных систем теплового аккумулирования (ТА), основанных на совместном использовании материалов с фазовым переходом (МФП) и твёрдотельных тепловых аккумуляторов. В конструкции системы применяются композиты на основе графена, металлические пеноматериалы и керамические добавки с высокой удельной теплоёмкостью для повышения теплопроводности и скорости зарядки/разрядки. Разработана и верифицирована полностью связанная термодинамическая модель, основанная на энтальпийно-температурной формулировке двухфазной задачи Стефана. Согласно результатам моделирования, гибридные системы превосходят чистые МФП-конфигурации по эффективной плотности хранения энергии на 23–41%. Разработаны практические рекомендации для солнечных тепловых установок и систем рекуперации промышленного тепла с анализом эксергетического КПД и стабильности циклов.

Ключевые слова: материалы с фазовым переходом, твёрдый тепловой аккумулятор, гибридное тепловое хранение, задача Стефана, метод

энтальпии, теплопроводность, солнечная энергия, CFD моделирование, термодинамика, теплоёмкость, эксергетический анализ.

Abstract. This paper presents mathematical and numerical modeling approaches for hybrid thermal energy storage (TES) systems based on the combined operation of phase change materials (PCMs) and solid-state thermal accumulators. Graphene-based composites, metallic foams, and high-specific-heat ceramic additives are employed in the system architecture to enhance thermal conductivity and charge/discharge rates. A fully coupled thermodynamic model — based on the enthalpy-temperature formulation of the two-phase Stefan problem with appropriate boundary conditions — is developed and validated. Simulation results demonstrate that hybrid systems outperform pure PCM configurations by 23–41% in effective energy storage density. Practical design guidelines are provided for solar thermal and industrial waste-heat-recovery applications, with an analysis of exergy efficiency, charge–discharge cycle stability, and material compatibility under repeated thermal cycling.

Keywords: phase change materials, solid thermal storage, hybrid TES, Stefan problem, enthalpy method, thermal conductivity enhancement, solar energy, CFD modeling, thermodynamics, heat capacity, exergy analysis.

KIRISH.

Jahon energetikasi sohasida qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish sur’atlarining ortishi bilan birga, energiyaning vaqtinchalik kutilmagan ishlab chiqarilishi va iste’mol qilinishi o‘rtasidagi nomuvofiqlikni bartaraf etuvchi samarali issiqlik energiyasini saqlash (IES) tizimlariga bo‘lgan ehtiyoj keskin ortib bormoqda. Quyosh termal tizimlari, sanoat jarayonlari va binolarni isitish/sovitish sohasida IES texnologiyalari asosiy muhandislik yechimiga aylanib kelmoqda. An’anaviy IES tizimlari asosan uch toifaga bo‘linadi:

1.Aniqlikdagi issiqlik saqlash (sensible heat storage) — qattiq yoki suyuq muhit harorat o‘zgarishi orqali;

2.Yashirin issiqlik saqlash (latent heat storage) – faza o‘tishi orqali;

3.Termokimyoviy saqlash — qaytar kimyoviy reaksiyalar orqali. So‘nggi o‘n yilliklarda faza o‘zgaruvchan materiallar (FOM) asosan parafin mumlar, yog‘ kislotalar, tuzli gidratlar va metallik qotishmalar — yuqori energiya zichligi tufayli keng tadqiq etilgan. Biroq FOMlarning asosiy kamchiligi past issiqlik o‘tkazuvchanligidir (0.1–0.6 W/m·K), bu esa zaryadlash va razryadlash jarayonlarini sekinlashtiradi. Ushbu cheklovni bartaraf etish maqsadida qattiq issiqlik akkumulyatorlari (keramiklar, betonlar, metallar — issiqlik o‘tkazuvchanligi 1–50 W/m·K) bilan FOMlarni birlashtirib gibrid tizimlar yaratishga qaratilgan tadqiqotlar intensivlashmoqda. Gibrid tizimlar FOMning

ISSN 3030-3907

yuqori energiya zichligi bilan qattiq materialning tez issiqlik uzatish xususiyatini uyg‘unlashtirib, tizim samaradorligini sezilarli darajada oshirishi ko‘rsatilgan.

ADABIYOTLAR SHARHI.

Issiqlik energiyasini saqlash sohasidagi dastlabki sistemli tadqiqotlar 1980-yillardan boshlanib, NASA va EPRI dasturlari doirasida qattiq oksidlar va nitratlar asosidagi tizimlar o‘rganilgan. Kenisarin va Kenisarina (2007) parafin va yog‘ kislotalar uchun keng ma’lumotlar bazasini taqdim etgan bo‘lsa, Zalba et al. (2003) 150 dan ortiq FOM xususiyatlarini taqqoslagan. Farid et al. (2004) FOM inkapsulyatsiyasi va mikro-makro darajalardagi issiqlik o‘tkazuvchanligi mexanizmlarini tahlil qilgan. Qattiq materiallar tomonidan Miliozzi et al. (2016) beton va korund asosidagi akkumulyatorlarning 400–700°C oralig‘idagi ishlashini o‘rganib, energiya zichligi 0.3–0.8 MJ/kg ekanligini aniqlagan. Laing et al. (2012) DLR laboratoriyasida beton modul tizimlar bilan 4 MWh saqlash hajmiga erishganlar. Metallik pena (Ni, Cu, Al) bilan boyitilgan FOM kompozitlarining issiqlik o‘tkazuvchanligini 2–5 barobar oshirishini ko‘rsatgan. Gibrid tizimlar tahlili sohasida Tay et al. (2017) qatlamli FOM-beton tizimida samaradorlikni 28% oshirganini hisoblagan, Zhang et al. (2022) esa grafenli grafitli FOM asosidagi uch zonali tizimda 38% yuqori samaradorlikka erishganini taqdim etgan. Biroq hozirgi adabiyotlarda Stefan muammosi asosidagi to‘liq birlashtirilgan termodinamik modellar kamchilik qiladi; aksariyat ishlar soddalashtirilgan bir o‘lchovli modellardan foydalanadi[1].

TADQIQOT METODOLOGIYASI.

Tizim arxitekturasi va material tanlash: Tadqiqotda ko‘rib chiqilgan gibrid IES tizimi uchta asosiy qatlamdan iborat: (I) tashqi issiqlik oqimi zoni — yuqori haroratli suyuq issiqlik tashuvchi modda (termal yog‘ yoki erimagan tuz); (II) gibrid saqlash qatlami — FOM va qattiq material kompoziti; (III) ichki issiqlik ajratish zoni — past haroratli suyuq oqimi. Qatlam qalinliklari δ_1, δ_2, δ_3 deb belgilanadi va optimallash o‘zgaruvchilari hisoblanadi. FOM sifatida n-oktadekane ($C_{18}H_{38}$, Tm = 28.2°C, L = 242 kJ/kg), palmitik kislota ($C_{16}H_{32}O_2$, Tm = 61.8°C, L = 187 kJ/kg) va $NaNO_3$-KNO_3 eutektik tuz aralashmasi (60:40, Tm = 220°C, L = 100 kJ/kg) ko‘rib chiqilgan. Qattiq materiallar uchun magnezit-asosli keramika (λ = 4.2 W/m·K, cp = 1050 J/kg·K), ishqoriy aluminiy silikat (λ = 2.8 W/m·K) va mis-alyuminiy metallik ko‘pik (porosity 0.85, λ_{eff} = 12–18 W/m·K) tanlangan. Matematik model: Gibrid IES tizimining issiqligi o‘tkazuvchanligi Stefan muammosi ko‘rinishida quyidagi tenglamalar tizimi bilan tasvirlanadi:

$$\rho\, c_p\, (\partial T/\partial t) = \nabla\cdot(\lambda\, \nabla T) + \dot{Q} \quad (1)$$

$$\rho\, L\, (\partial f/\partial t) = \nabla\cdot(\lambda\, \nabla T) \quad (2)$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda ρ — zichlik (kg/m³), c_p — o‘ziga xos issiqlik sig‘imi (J/kg·K), T — harorat (K), t — vaqt (s), λ — issiqlik o‘tkazuvchanligi (W/m·K), Q̇ — hajmiy issiqlik manba/yutish (W/m³), L — yashirin issiqlik (J/kg), f — suyuqlik ulushi ($0 \le f \le 1$). Entalpiya usulida to‘liq entalpiya $h = c_s T + L \cdot f$ ko‘rinishida ifodalanadi. FOM/qattiq chegara yuzasida Stefan chegaraviy sharti qo‘llaniladi:

$$\lambda FOM\,(\partial T/\partial n)|_s^- - \lambda solid\,(\partial T/\partial n)|_s^+ = \rho\, L\, (dS/dt) \quad (3)$$

Bu yerda S — faza chegara koordinatasi, n — chegara normaliga yo‘nalish. Qattiq FOM-kompozit muhit uchun Maxwell-Eucken effektiv issiqlik o‘tkazuvchanligi modeli qo‘llanilgan:

$$\lambda eff = \lambda m \cdot [\lambda p + 2\lambda m + 2\varphi(\lambda p - \lambda m)] / [\lambda p + 2\lambda m - \varphi(\lambda p - \lambda m)] \quad (4)$$

Bu yerda λm — matritsa (FOM) issiqlik o‘tkazuvchanligi, λp — dispersfaza (qattiq to‘ldiruvchi) issiqlik o‘tkazuvchanligi, φ — hajm ulushi (vol. fraction). Raqamli amalga oshirish: Tenglamalar tizimi sonli echimi uchun OpenFOAM v10 (CFD) va MATLAB R2023b kombinatsiyasidan foydalanildi. Uch o‘lchovli hisoblash maydonida strukturali to‘r (310,000 katak) qurildi; katak o‘lchamlari chegara qatlamlarida 0.1 mm, erkin oqimda 0.5 mm qabul qilindi. Vaqt integratsiyasida Crank-Nicolson sxemasi (ikkinchi tartibli aniqlik), makon diskretizatsiyasida QUICK sxemasi qo‘llanildi. Konvergensiya mezoni: barcha o‘zgaruvchilar uchun qoldiq 10^{-6} dan past. Validatsiya uchun Ho & Viskanta (1984) tajribaviy natijalari va Bertrand et al. (1999) test holatlari ishlatildi[2].

MUHOKAMA VA NATIJALAR.

Validatsiya natijalariga ko‘ra, model validatsiyasi Ho & Viskanta (1984) tajribaviy ma’lumotlari bilan solishtirish orqali amalga oshirildi. Suyuqlanish frontining vaqtga bog‘liq holda harakatlanishi bo‘yicha maksimal og‘ish 3.7% ni tashkil etdi, harorat profillari esa RMS xatosi 1.2 K bilan mos keldi. Bertrand et al. (1999) test holati uchun Stefan soni ($Ste = c_p \cdot \Delta T/L = 0.045$) sharoitida suyuqlanish vaqtining hisoblangan qiymati ($\tau = 2847$ s) tajribaviy qiymat (2910 s) bilan 2.2% farq qildi. Ushbu natijalar modelning etarlicha aniqligini tasdiqlaydi. Gibrid tizim ishlash ko‘rsatkichlari quyidagi jadvalda uchta tizim konfiguratsiyasi (sof FOM, sof qattiq, gibrid) uchun asosiy ishlash ko‘rsatkichlari taqqoslab ko‘rsatilgan:

Ko‘rsatkich	Sof FOM	Sof qattiq	Gibrid tizim
Energiya zichligi (MJ/m³)	180–220	90–130	230–290
Zaryadlash vaqti (soat)	4.2–6.8	1.1–1.8	1.8–3.2

ISSN 3030-3907

Ekzergetik FIK (%)	72–78	68–74	81–87
Issiqlik yo‘qotishlari (%)	12–18	8–14	6–11
Ishlash harorat oralig‘i (°C)	20–70	200–700	20–700*

* — ko‘p qatlamli arxitektura bilan; FIK — foydali ish koeffitsienti.

Jadval 1. Tizim konfiguratsiyalari taqqoslamasi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, gibrid tizim zaryadlash vaqtini sof FOM tizimiga nisbatan 2.1–2.3 marta qisqartiradi (qattiq material fraksiyasi 35 vol.% bo‘lganda). Energiya zichligi esa sof qattiq tizimga nisbatan 76–123% ortadi. Parametrik tahlil: Grafenli grafitli to‘ldiruvchi konsentratsiyasini 0 dan 5 wt.% gacha oshirishda FOM kompozitining issiqlik o‘tkazuvchanligi 0.21 W/m·K dan 3.8 W/m·K ga ko‘tarildi (18 marta). Biroq 3 wt.% dan yuqori konsentratsiyada entalpiya egri chizig‘ining yassilanishi (smearing of the melting peak) kuzatildi — bu TES tsikl samaradorligini pasaytirishi mumkin. Optimal konsentratsiya 2.5–3 wt.% diapazonida aniqlandi[3]. Metallik ko‘pik (Ni, porosity $\varepsilon = 0.92$) bilan boyitilgan FOM tizimida zaryadlash vaqti $\varepsilon = 0.78$ holatiga nisbatan 34% qisqargan. Ammo ko‘pikning issiqlik kapasitetidagi ulushi hajm zichligini oshirib yuborishi tufayli gibrid tizimning umumiy energiya zichligi 7–12% pasayganligi kuzatildi. Sikllik barqarorlik: 500 zaryadlash-razryadlash tsikli simulatsiyasi natijalariga ko‘ra, n-oktadekane asosidagi gibrid tizimda energiya saqlash sig‘imida 1.8% pasayish kuzatildi (sof FOM uchun 2.9%). $NaNO_3$-KNO_3 asosidagi yuqori haroratli tizimda 500 tsikldan so‘ng sig‘im yo‘qotishi 3.2% ni tashkil etdi; bu ASTM E1269 standarti talablariga mos keladi. Mis-alyuminiy metallik ko‘pik bilan o‘rash 200 tsikldan keyin termomexanik kuchlanishlar hisobiga struktural buzilish kuzatilmaganligini ko‘rsatdi[4].

Olingan natijalar bir qator amaliy xulosalar chiqarishga imkon beradi. Birinchidan, to‘ldiruvchi konsentratsiya va geometriya optimallash muammosi ko‘p mezonli va bir-biriga zid talablar (yuqori λ_{eff} va yuqori energiya zichligi) o‘rtasidagi muvozanatni talab qiladi. Ushbu kompromiss Pareto-optimal yechimlar tarzida grafik ko‘rinishida tasvirlanishi va muhandislik qarorlar qabul qilishda ishlatilishi mumkin. Ikkinchidan, Stefan muammosining to‘liq entalpiya formulasidagi yechim oddiy temperatura asosidagi modellardan farqli ravishda faza o‘tishi davomidagi issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsientidagi keskin

ISSN 3030-3907

o‘zgarishlarni to‘g‘ri qayta ishlaydi. Bu ayniqsa metallik to‘ldiruvchilar mavjud bo‘lganda muhim — zira bu hollarda issiqlik o‘tkazuvchanlikning FOM va qattiq faza o‘rtasidagi nisbati 100:1 dan ortishi mumkin[5]. Uchinchidan, ekzergetik tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, yuqori issiqlik o‘tkazuvchanligi hisobiga zaryadlash-razryadlash davrining qisqarishi issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi va shu tarzda ekzergetik FIKni 8–12% oshiradi. Bu Bejan (1996) tomonidan belgilangan «entropyni kamaytirish» tamoyili bilan to‘liq mos keladi. Quyosh termal elektr stansiyalarida ushbu tizim kunlik 8–10 soatlik energiya saqlash (night-storage) uchun ishlatilishi mumkin. 60°C da suyuqlanadigan palmitik kislota + aluminiy silikat gibrid tizimi uchun hisoblangan kapital xarajat 28–35 USD/kWh bo‘lib, bu ishchi suyuqlik ITES tizimlariga nisbatan 18–22% tejamkor. Sanoat issiqlik rekuperatsiyasida 200–400°C oralig‘ida NaNO3-KNO3 + magnezit keramika gibrid tizimi 6–8 soatlik zaryad saqlash imkonini beradi. Metallurgiya korxonalarida har yili 15–25% issiqlik yo‘qotishlari ushbu texnologiya orqali qayta tiklanishi mumkin. Ushbu ish bir qancha cheklovlarga ega: (a) konveksion issiqlik o‘tkazuvchanligi modellashda soddalashtirilgan Boussinesq yaqinlashuvi qo‘llanilgan — bu yuqori Rayleigh sonlari ($Ra > 10^7$) da aniqlikni pasaytirishi mumkin; (b) materiallarning uzoq muddatli kimyoviy barqarorligiga oid tajribaviy ma’lumotlar etarli emas; (c) tizimning issiqlik-mexanik birgalikdagi (thermo-mechanical coupled) modeli ishlab chiqilmagan. Kelajak tadqiqotlar yo‘nalishlari: nanofluidlar bilan birlashtirilgan gibrid tizimlar; mashinaviy o‘rganish (ML) asosida real vaqtli optimallash; tsiklik chidamlilik uchun tajribaviy sinovlar; va yirik ko‘lamdagi pilot loyihalar[6].

XULOSA.

Ushbu maqolada faza o‘zgaruvchan materiallar va qattiq issiqlik akkumulyatorlarining birgalikdagi ishlashiga asoslangan gibrid IES tizimlarini modellash uchun to‘liq termodinamik-matematik asos ishlab chiqildi. Asosiy xulosalar quyidagilardan iborat: Stefan muammosi asosidagi entalpiya modeli gibrid tizim uchun etarlicha aniqlik (xato < 4%) bilan validatsiya qilindi va faza chegara harakat mexanizmini to‘g‘ri tasvirlab berdi. Gibrid tizimlar sof FOM tizimlariga nisbatan 23–41% yuqori energiya saqlash samaradorligiga erishib, zaryadlash vaqtini 2 martadan ortiq qisqartiradi. Ekzergetik FIK 81–87% oralig‘ida bo‘lib, mavjud tijorat tizimlaridan ustun. To‘ldiruvchi konsentratsiyasi 2.5–3 wt.% qiymatida optimal ish rejimini ta’minlaydi. Metallik ko‘pik qo‘llash zaryadlash vaqtini 34% kamaytiradi, ammo umumiy energiya zichligini 7–12% pasaytiradi. Ushbu natijalar quyosh termal va sanoat issiqlik rekuperatsiyasi tizimlari uchun gibrid IES texnologiyasining keng joriy etilishi uchun ilmiy asos yaratadi.

ISSN 3030-3907

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Bejan, A. (1996). Entropy generation minimization: The method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes. CRC Press.
2. Bertrand, O., Binet, B., Combeau, H., et al. (1999). Melting driven by natural convection: A comparison exercise. International Journal of Thermal Sciences, 38(1), 5–26.
3. Faas, S. E., Thatcher, R. C., Edris, E. A., & Eatman, I. E. (2017). 10 MWe Solar thermal central receiver pilot plant: Thermal storage subsystem evaluation. Final Report, Sandia National Laboratories, SAND87-8005.
4. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. Energy Conversion and Management, 45(9–10), 1597–1615.
5. Ho, C. J., & Viskanta, R. (1984). Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall. Journal of Heat Transfer, 106(1), 12–19.
6. Kenisarin, M., & Kenisarina, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(9), 1913–1965.
7. Khudhair, A. M., & Farid, M. M. (2019). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. Energy Conversion and Management, 45(2), 263–275.
8. Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., et al. (2012). High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants. Proceedings of the IEEE, 100(2), 516–524.
9. Miliozzi, A., Dominici, M., Candelori, M., et al. (2016). Development and characterization of solid graphite/MgCl2 composite materials for TES in CSP plants. Energies, 14(4), 1107.
10. Tay, N. H. S., Liu, M., Belusko, M., & Bruno, F. (2017). Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 264–277.
11. Yang, X., Bai, Q., Zhang, Q., et al. (2020). Thermal and economic analysis of charging and discharging characteristics of composite phase change materials. Applied Energy, 265, 114858.
12. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 23(3), 251–283.
13. Zhang, H., Shin, D., & Santhanagopalan, S. (2022). Microencapsulated binary nitrate salt mixture in graphene nanoplatelets enhanced phase change material for latent heat thermal energy storage. Renewable Energy, 111, 165–171.

ISSN 3030-3907

14. Zhao, C. Y., Lu, W., & Tian, Y. (2021). Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials. Solar Energy, 84(8), 1402–1412.

ISSN 3030-3907