QOVURG‘ALI ISSIQLIK QUVURLARINI KONSTRUKTIV JIHATDAN BAHOLASH

Abdullayev Nodirbek Azatvoy o‘g‘li
Toshkent davlat texnika universiteti PhD
Jo‘rayev Ravshan Rustam o‘g‘li
Toshkent davlat texnika universiteti Tadqiqodchi
Shaislamov Alisher Shabdurahmanovich.
Toshkent davlat texnika universiteti Professor
E-mail: rjgreat1994@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada parafin asosidagi issiqlik akkumulyatsiya materialiga o‘rnatilgan qovurg‘ali issiqlik quvurlari (gravitatsion termosifonlar) yordamida ishlaydigan vertikal turdagi yashirin issiqlik akkumulyatori tahlil qilinadi. Tadqiqotning asosiy yo‘nalishi issiqlik quvurlarining soni, geometrik o‘lchamlari va ularning o‘zaro joylashish masofalari o‘zgarmagan holda, quvurlarga o‘rnatiladigan qovurg‘alarning geometrik o‘lchamlari hamda joylashish sxemasini optimallashtirishdan iborat. Tadqiqot obyekti radiusi 5 mm bo‘lgan issiqlik quvurlari joylashtirilgan sig‘imdan tashkil topib, quvurlar orasidagi masofa 116 mm, qatorlar oralig‘idagi masofa esa 145 mm etib belgilangan.

Kalit so‘zlar: issiqlik akkumulyatori, parafin, issiqlik quvuri, qovurg‘a samaradorligi, geometriyani optimallashtirish, Stefan masalasi.

Аннотация. В статье рассматривается вертикальный аккумулятор скрытой теплоты, работающий на основе оребрённых тепловых труб (гравитационных термосифонов), размещённых в теплоаккумулирующем материале на основе парафина. Основной целью исследования является оптимизация геометрических размеров и схемы расположения рёбер, установленных на тепловых трубах, при неизменном количестве труб, их геометрических размерах и расстояниях между ними. Объект исследования представляет собой ёмкость с размещёнными в ней тепловыми трубами радиусом 5 мм. Расстояние между трубами составляет 116 мм, а расстояние между рядами — 145 мм.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, парафин, тепловая труба, эффективность ребра, оптимизация геометрии, задача Стефана.

Abstract. This article investigates a vertical latent heat storage unit incorporating finned heat pipes (gravity-assisted thermosyphons) embedded in a paraffin-based thermal energy storage material. The main objective of the study is to optimize the geometric dimensions and arrangement of the fins attached to the heat pipes while keeping the number of heat pipes, their geometric dimensions, and the spacing between them unchanged. The research object consists of a storage tank

ISSN 3030-3907

containing heat pipes with a radius of 5 mm. The distance between the heat pipes is 116 mm, while the distance between the rows is 145 mm.

Keywords: heat accumulator, paraffin, heat pipe, fin efficiency, geometry optimization, Stefan problem.

1. KIRISH.

Issiqlik energiyasini parafin asosidagi issiqlik akkumulyatsiya materiallarida (PIAM) fazaviy o‘tishning yashirin issiqligidan foydalanib to‘plash issiqlik energiyasini ishlab chiqarish va iste’mol qilish jarayonlaridagi vaqt bo‘yicha nomuvofiqlikni kamaytirishning samarali usullaridan biri hisoblanadi. Bunday tizimlar, xususan, issiq suv ta’minoti qurilmalarida, quyosh kollektorlarida hamda issiqlik nasoslari asosidagi tizimlarda keng qo‘llaniladi. Parafinlarning erish jarayonida yuqori solishtirma yashirin issiqlik ajralishi va haroratning deyarli o‘zgarmas saqlanishi bir xil hajmda suvning sezilarli issiqlik sig‘imiga nisbatan ko‘proq energiya zaxiralash imkonini beradi. Parafinli issiqlik akkumulyatsiya materiallarining materialshunoslik va issiqlik-fizik xususiyatlari Zalba [1] hamda Sharma [2] tomonidan tayyorlangan sharh maqolalarida batafsil o‘rganilgan.

Shu bilan birga, parafinning issiqlik o‘tkazuvchanligi juda past bo‘lib, odatda 0,1–0,2 Vt/(m·K) atrofida bo‘ladi. Bu xususiyat mazkur turdagi issiqlik akkumulyatorlarining asosiy cheklovlaridan biridir. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishning maxsus usullari qo‘llanilmasa, qurilmaning zaryadlanishi va razryadlanishi, ya’ni issiqlikni to‘plash va qaytarish jarayonlari sekinlashadi. Natijada tizimning umumiy samaradorligi nafaqat issiqlik akkumulyatsiya materialining issiqlik sig‘imiga, balki issiqlik almashinuvi yuzasining geometrik tuzilishiga ham bevosita bog‘liq bo‘ladi.

Issiqlik almashinuvini kuchaytirishning istiqbolli usullaridan biri issiqlikni PIAM qatlamiga issiqlik quvurlari, ya’ni gravitatsion termosifonlar orqali uzatishdir. Bunday qurilmalarda issiqlikning o‘q bo‘ylab uzatilishi juda yuqori bo‘lib, u metallarning issiqlik o‘tkazuvchanligidan 2–3 tartib yuqori bo‘lishi mumkin. Rashidi va boshqalar [3] tomonidan olib borilgan sharh tadqiqotida parafinli issiqlik akkumulyatorlarini issiqlik quvurlari va issiqlik nasoslari bilan birlashtirishning turli yechimlari tahlil qilingan. Ushbu tadqiqot natijalariga ko‘ra, bunday tizimlarda zaryadlanish tezligini belgilovchi muhim omillardan biri issiqlik quvuridan PITAMga radial yo‘nalishda issiqlik uzatilishidir. Shu sababli issiqlik quvurining ichki o‘qiy issiqlik uzatish qobiliyatidan tashqari, uning tashqi yuzasini qovurg‘alar bilan jihozlash masalasi ham muhim ahamiyat kasb etadi.

PITAMning erish tezligiga qovurg‘alarning geometrik xususiyatlari ta’sirini o‘rganish quvurli va “quvur ichida quvur” tipidagi issiqlik almashinuv modullarida

ISSN 3030-3907

alohida va jadal rivojlanayotgan tadqiqot yo‘nalishlaridan biridir. Wołoszyn va Szopa [4] qovurg‘alar hamda quvurlar to‘plami geometriyasini birgalikda optimallashtirish natijasida parafinning erish vaqtini 44–60 % gacha qisqartirish mumkinligini ko‘rsatgan. Singh va Iqbal [5] tomonidan keltirilgan sharhda esa qovurg‘alarning shakli va yo‘nalishi quvurli issiqlik akkumulyatorlarida issiqlik almashinuvini jadallashtiruvchi asosiy geometrik omillardan biri sifatida qayd etilgan.

Qovurg‘aning uzunligi va uning yo‘nalish burchagining ta’siri Zhang va [6] tomonidan tadqiq etilgan. Vertikal issiqlik akkumulyatori misolida ushbu tadqiqotchilar qovurg‘aning optimal uzunligi va optimal burchagi bir-biri bilan bog‘liq ekanligini hamda ularni bir-biridan mustaqil ravishda tanlash maqsadga muvofiq emasligini aniqlagan. Qovurg‘alar sonining ta’siriga oid shunga yaqin xulosa Yang [7] tomonidan gorizontal “quvur ichida quvur” tipidagi modul uchun olingan. Ularning natijalariga ko‘ra, qovurg‘alar sonining ortishi erish jarayonini tezlashtiradi, biroq bu ta’sir chegaralangan bo‘lib, qovurg‘alarning o‘zaro joylashishiga ham sezilarli darajada bog‘liq.

Guo va boshqalar [8] tomonidan olib borilgan tadqiqotda qovurg‘alarni quvur uzunligi va aylana bo‘ylab burchak yo‘nalishi bo‘yicha notekis joylashtirish an’anaviy bir tekis taqsimlangan qovurg‘ali konstruksiyaga nisbatan to‘liq erish vaqtini qariyb 70 % gacha qisqartirishi mumkinligi ko‘rsatilgan. Bu natija qovurg‘alarning burchak bo‘yicha taqsimlanishi faqat ularning soni yoki uzunligi tanlangandan keyingi ikkilamchi parametr emas, balki mustaqil va muhim optimallashtirish omili ekanligini ko‘rsatadi.

Mazkur masalaga yanada umumiy yondashuv qovurg‘aning shaklini topologik optimallashtirish orqali aniqlashdan iborat. Pizzolato va boshqalar [9] tomonidan “quvur ichida quvur” tipidagi issiqlik akkumulyatorida amalga oshirilgan bunday optimallashtirish natijasida oddiy geometrik shakllardan sezilarli darajada farq qiluvchi murakkab qovurg‘a konfiguratsiyalari olingan va ularning issiqlik samaradorligi yuqori ekanligi ko‘rsatilgan. Biroq bunday usul har bir yangi quvur joylashuvi uchun alohida bog‘langan optimallashtirish masalasini yechishni talab qiladi hamda ko‘plab konstruktiv variantlarni tezkor ravishda tahlil qilish nuqtayi nazaridan katta hisoblash resurslarini talab etadi.

Ushbu tadqiqot yuqorida qayd etilgan ishlarning umumiy xulosasiga, ya’ni qovurg‘aning shakli, uzunligi, burchagi va soni o‘zaro bog‘langan holda issiqlik almashinuvi natijasiga nochiziqli ta’sir ko‘rsatishi haqidagi fikrga asoslanadi. Shu bilan birga, to‘liq topologik optimallashtirishdan farqli ravishda, mazkur ishda to‘g‘ri chiziqli va diskret qovurg‘alarni qo‘shni quvurlarning haqiqiy geometrik joylashuviga yo‘naltirishga asoslangan aniq geometrik yondashuvdan foydalaniladi. Bunday yondashuv quvurlarni joylashtirishning turli variantlarini

ISSN 3030-3907

har bir holat uchun alohida optimallashtirish masalasini yechmasdan, tezkor ravishda taqqoslash imkonini beradi.

Fazaviy o‘tish jarayonini matematik modellashtirishda qo‘llaniladigan sonli usulni tanlash ham alohida ahamiyatga ega. Voller va Cross [10] tomonidan ishlab chiqilgan klassik entalpiya usuli qo‘zg‘almas hisoblash to‘rida Stefan masalasini yechish uchun hozirgi vaqtda ham keng qo‘llaniladigan yondashuvlardan biri hisoblanadi. Jamal-Abad va boshqalar [11] texnik parafinning kristallanish jarayonini modellashtirishda entalpiya-g‘ovak muhit usuli bilan samarali issiqlik sig‘imi (Apparent Heat Capacity — AHC) usulini o‘zaro taqqoslagan. Bunda materialning issiqlik-fizik xususiyatlari differensial skanerlovchi kalorimetriya ma’lumotlari asosida mustaqil ravishda aniqlangan. Tadqiqot natijalari har ikkala usulning tajriba natijalaridan turlicha og‘ishini ko‘rsatgan: entalpiya-g‘ovak muhit usuli bevosita fazaviy o‘tish jarayonini ifodalashda nisbatan katta farq bergan bo‘lsa, AHC usulida ikki fazali o‘tish zonasini tavsiflash bilan bog‘liq cheklovlar kuzatilgan. Shu sababli fazaviy o‘tish zonasining nozik tuzilishidan ko‘ra, erish frontining rivojlanish kinetikasi muhim bo‘lgan masalalarda AHC usulidan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi. Quyida AHC formulirovkasiga asoslangan ikki o‘lchamli issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasini yechishda qo‘llanilgan aniq chekli ayirmalar sxemalarining barqarorligi va aniqligi Haque va boshqalar [12] tomonidan batafsil tahlil qilingan.

Quyida foydalaniladigan faqat issiqlik o‘tkazuvchanlikka asoslangan erish modelining cheklangan jihatlari ikkita mustaqil tadqiqot natijalari orqali yaqqol ko‘rinadi. Ji va boshqalar [13] tomonidan bajarilgan sonli hisoblashlarda yopiq bo‘shliqda turli uzunlikdagi bir juft qovurg‘a mavjud bo‘lgan holatda PIAMning erishi o‘rganilgan. Natijalar eritmadagi tabiiy konveksiya nafaqat erish tezligini o‘zgartirishini, balki sof konduktiv modelga nisbatan erish frontining shakliga ham ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatgan.

Sun va boshqalar [14] esa yopiq bo‘shliqda joylashgan parafinli PIAM — oktadekan uchun tajribaviy tadqiqot olib borib, konveksiya hisobiga yuzaga keladigan samarali issiqlik uzatish koeffitsiyenti faqat konduktiv issiqlik uzatish holatiga nisbatan 12–30 % yuqori ekanligini aniqlagan. Shuningdek, to‘liq erish vaqti sof issiqlik o‘tkazuvchanlik asosidagi hisoblash natijasiga nisbatan taxminan 45 % ga qisqargan.

Mazkur tadqiqotda qovurg‘alar orasidagi bir necha millimetr tartibidagi tor bo‘shliqlarda yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan tabiiy konveksiya hisobga olinmaganligi sababli, quyida keltiriladigan zaryadlanish vaqtiga oid natijalarni aniq prognoz sifatida emas, balki konservativ baho, ya’ni zaryadlanish vaqtining yuqori chegarasi sifatida talqin qilish lozim.

Ko‘rib chiqilayotgan

ISSN 3030-3907

2. TADQIQ ETILAYOTGAN VARIANTLARNING GEOMETRIK TUZILISHI.

Tadqiqot obyekti sifatida diametri 10 mm, ya'ni radiusi R = 5 mm bo‘lgan taklif etilayotgan issiqlik quvuri (gravitatsion termosifon) qabul qilingan. Issiqlik quvurlari ixcham parafinli issiqlik akkumulyatorlariga xos bo‘lgan ikki qatorli quvurlar to‘plamiga joylashtirilgan. Bunda bir qatordagi quvurlar qadami P = 116 mm, korpusning chuqurligi esa D = 145 mm qilib belgilangan. Ushbu geometrik nisbat quvurlarni zich joylashtirish imkonini beradi va qo‘shni quvurlar qovurg‘alari orasida texnologik jihatdan amalga oshirilishi mumkin bo‘lgan, bir necha millimetr miqdoridagi oraliq masofani ta'minlaydi. Mazkur oraliqlar ham bir qator ichidagi, ham qatorlar orasidagi qovurg‘alar uchun mavjud.

Tadqiqot davomida issiqlik quvurlarining soni va asosiy o‘lchamlari o‘zgartirilmaydi. Variatsiya qilinadigan parametrlar sifatida har bir quvurdagi qovurg‘alar soni, ularning uzunligi va yo‘nalish burchagi, shuningdek, quvurlar qatorlarining korpus chuqurligi bo‘yicha joylashish holati ko‘rib chiqiladi. Bunda korpusning umumiy chuqurligi D doimiy qiymatda saqlanadi. Tadqiqotda jami to‘rtta konstruktiv variant ko‘rib chiqildi (1-rasm).

A varianti. Har bir issiqlik quvuri o‘qiga nisbatan ±90°/0° yo‘nalishda uchta to‘g‘ri qovurg‘a o‘rnatilgan. Har bir qovurg‘aning uzunligi 50 mm bo‘lib, ushbu sxema qovurg‘alarning eng sodda va bir tekis taqsimlangan joylashuvini ifodalaydi. Bitta quvur uchun qovurg‘alarning umumiy metall uzunligi 150 mm ni tashkil etadi.

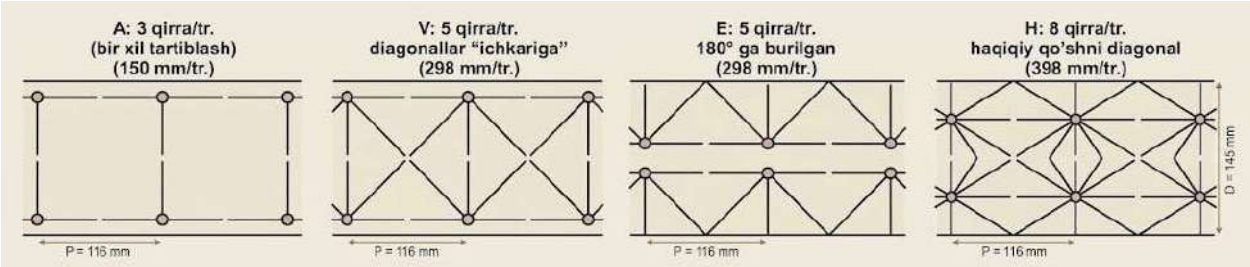
B varianti. Ushbu konstruksiyada jami beshta qovurg‘adan foydalaniladi. Ularning uchtasi A variantidagi kabi ±90°/0° yo‘nalishda joylashgan bo‘lib, uzunligi 50 mm ga teng. Qolgan ikkita qovurg‘a diagonal yo‘nalishda, ya'ni ±45,25° burchak ostida joylashtirilgan va har birining uzunligi 74,17 mm ni tashkil etadi. Diagonal qovurg‘alar qarama-qarshi qatorda joylashgan quvurlar tomon, ya'ni qurilmaning ichki qismiga yo‘naltirilgan. Ushbu variantda bitta quvurga to‘g‘ri keladigan qovurg‘alar uzunligining umumiy qiymati 298 mm ni tashkil qiladi.

E varianti. E variantida B variantidagi kabi jami beshta qovurg‘a qo‘llaniladi. Biroq bu holatda har bir quvurdagi qovurg‘alar to‘plami 180° ga burilgan. Natijada qovurg‘alar qarama-qarshi qatordagi quvurlar tomon emas, balki o‘ziga eng yaqin bo‘lgan korpus devori tomon yo‘naladi. Shu bilan birga, quvurlar qatorlari korpusning markaziy qismiga yaqinlashtiriladi. Mazkur konstruksiyada ham bitta quvurga sarflanadigan metall miqdori B variantidagi kabi 298 mm/quvur bo‘lib qoladi. Demak, B va E variantlari o‘rtasidagi asosiy farq qovurg‘alarning uzunligi yoki sonida emas, balki ularning fazoviy yo‘nalishida namoyon bo‘ladi.

ISSN 3030-3907

H varianti. Ushbu variantda har bir quvurga jami 8 ta qovurg‘a o‘rnatiladi. Ulardan 4 tasi to‘g‘ri qovurg‘alar bo‘lib, ular 0°/90°/180°/270° yo‘nalishlarda joylashtiriladi. Ularning uzunligi 29–50 mm oralig‘ida bo‘lib, A va B variantlaridagi qovurg‘alarga nisbatan qisqaroqdir. Buning sababi quvur qatorlarining korpus chuqurligi bo‘yicha D/4 va 3D/4 holatlarigacha bir-biriga yaqinlashtirilganligi hamda to‘liq qovurg‘a yoyilmasini joylashtirish uchun mavjud geometrik chegaralarning qisqarishidir.

H variantining qolgan 4 ta qovurg‘asi diagonal yo‘nalishda joylashtirilgan bo‘lib, ularning burchaklari ±58,0° va ±122,0°, uzunligi esa 60 mm ni tashkil etadi. Ushbu diagonal qovurg‘alar shunchaki qarama-qarshi yo‘nalishga emas, balki geometrik jihatdan haqiqiy eng yaqin qo‘shni quvur tomon yo‘naltirilgan. Mazkur yondashuv qovurg‘alar bilan qo‘shni quvurlar orasidagi geometrik moslikni yaxshilashga qaratilgan (quyida batafsil ko‘rib chiqiladi). H variantida bir quvurga to‘g‘ri keladigan qovurg‘alarning umumiy metall uzunligi 398 mm ni tashkil etadi.



1-rasm. A, B, E va H variantlarining geometrik tuzilishi (parafin zonasining kesim rejasi, P qadamining 1,5 qismi ko‘rsatilgan). Har bir sxema ostidagi son bitta issiqlik quvuriga to‘g‘ri keladigan qovurg‘alarning umumiy uzunligini bildiradi

Diagonal qovurg‘alar burchagini geometrik aniqlash

Diagonal qovurg‘alarni loyihalashda dastlab ularni aylana bo‘ylab bir xil burchak oralig‘ida joylashtirish tabiiy yechimdek ko‘rinadi. Masalan, bitta quvurga sakkizta qovurg‘a o‘rnatilganda, ular orasidagi burchakni 45° ga teng deb olish mumkin. Biroq keyingi tahlil shuni ko‘rsatdiki, bunday yondashuv har doim ham to‘g‘ri natija bermaydi. Dastlab sakkizta qovurg‘ali konstruksiyani ishlab chiqishda aynan shu tamoyil qo‘llanilgan: asosiy to‘rtta qovurg‘adan tashqari qolgan qovurg‘alar bissektrisa yo‘nalishida joylashtirilib, ularning uzunligi 45° doimiy burchak sharoitida deyarli qo‘shni qovurg‘agacha yetib boradigan qilib tanlangan. Ushbu dastlabki variant uchun hisoblangan metall sarfi 232–306 mm/quvur bo‘lib, to‘liq erish vaqti 25,8–29,8 soatni tashkil etgan.

Olingan natijalar yakuniy H variantiga nisbatan ancha past samaradorlikni ko‘rsatdi. H variantida metall sarfi 398 mm/quvur bo‘lishiga qaramay, to‘liq erish vaqti 13,2 soatgacha qisqargan. Metall sarfi qiymatlari bir-biriga yaqin bo‘lgan

ISSN 3030-3907

holatda bunday sezilarli farq qovurg‘alarning geometrik yo‘nalishini to‘g‘ri tanlash muhimligini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar yakuniy H variantiga nisbatan ancha past samaradorlikni ko‘rsatdi. H variantida metall sarfi 398 mm/quvur bo‘lishiga qaramay, to‘liq erish vaqti 13,2 soatgacha qisqargan. Metall sarfi qiymatlari bir-biriga yaqin bo‘lgan holatda bunday sezilarli farq qovurg‘alarning geometrik yo‘nalishini to‘g‘ri tanlash muhimligini ko‘rsatadi (5-rasm va quyidagi “Natijalar” bo‘limiga qarang).

Buning asosiy sababi 45° burchak faqat quvurlar qatori bo‘yicha qadam P bilan qatorlar orasidagi masofa Δy bir-biriga yaqin bo‘lgan holatda mos kelishidadir. Masalan, A va B variantlarida ushbu shart deyarli bajariladi. Shu sababli B variantidagi diagonal qovurg‘aning burchagi 45,25° bo‘lib, amalda 45° ga juda yaqin qiymatni beradi.

Biroq ko‘proq qovurg‘alarni joylashtirish maqsadida quvurlar qatorlari bir-biriga yaqinlashtirilganda, ya’ni H variantida qatorlar oralig‘i D/4 va 3D/4 holatlariga siljitilganda, quvurlar joylashgan geometrik panjara kvadrat shaklidan chetga chiqadi. Natijada ma’lum bir quvur uchun geometrik jihatdan eng yaqin diagonal qo‘shni quvur boshqa qatorda joylashadi va qator yo‘nalishi bo‘yicha to‘liq P qadamga siljigan bo‘ladi.

Shu sababli diagonal qovurg‘aning yo‘nalish burchagi oddiy 45° emas, balki quvurlar orasidagi haqiqiy geometrik masofalardan kelib chiqib aniqlanishi kerak. Mazkur burchak quyidagi ifoda orqali hisoblanadi:

$$\varphi = \operatorname{atan2}(P, \Delta y) = \operatorname{atan2}(116; 72{,}5) = 58{,}0° \quad (1)$$

Burchak 45°bo‘lmaganda masofa quyidagicha aniqlanadi

$$s = \sqrt{P^2 + \Delta y^2} \approx 137 \text{ мм} \quad (2)$$

Diagonal qovurg‘aning uzunligi ushbu masofaning yarmidan quvur radiusi va texnologik tirqish qiymatlarini ayirish orqali tanlanadi. Bunday yondashuv qovurg‘aning qarama-qarshi quvurdagi “ko‘zgu” qovurg‘asiga deyarli yetib borishini, biroq u bilan bevosita tutashib ketmasligini ta’minlaydi. Shunday qilib, H variantida 58,0° burchak va 60 mm uzunlik qiymatlaridan foydalanilgan, dastlabki variantda esa 45° va 37 mm qiymatlar qabul qilingan. Aynan shu geometrik farq yakuniy H variantining avvalgi variantga nisbatan yuqori samaradorligini izohlashga yordam beradi (quyidagi “Natijalar” bo‘limiga qarang).

MATEMATIK MODEL. TEZKOR KVAZISTATSIONAR BAHOLASH (STEFAN MASALASI)

Turli qovurg‘a konstruksiyalarini tezkor ravishda saralash va ko‘plab variantlarni dastlabki bosqichda baholash uchun Stefan masalasining kvazistatsionar, ya’ni muhandislik baholashiga asoslangan usuli qo‘llanildi. Ushbu yondashuvning kichik Stefan sonlari sharoitida qo‘llanishi Alexiades va Solomon

ISSN 3030-3907

monografiyasida [20] asoslab berilgan. Doimiy harorat farqi mavjud bo‘lgan sharoitda qalinligi x bo‘lgan parafin qatlamining to‘liq erish vaqtini quyidagi ifoda orqali taxminiy aniqlash mumkin:

$$t(x) = \frac{\rho L_{yash} x^2}{2k_s(T_{yuz} - T_{er})} \quad (3)$$

Mazkur usulni amaliy hisoblashga moslashtirish uchun hisoblash sohasidagi har bir nuqta ikkita asosiy kattalik bilan tavsiflanadi. Birinchi kattalik — ushbu nuqtadan eng yaqin qizdirilgan sirtgacha bo‘lgan x masofa, ikkinchisi esa mazkur sirtning nuqtaga eng yaqin qismidagi T_s haroratidir.

Ushbu ikki parametr geometrik jihatdan aniq hisoblanadi va issiqlik manbai shaklini diskretlashtirish bilan bog‘liq qo‘shimcha soddalashtirishlar kiritilmaydi. Aylana shaklidagi issiqlik quvuri uchun masofa radiusi R bo‘lgan aylana sirtigacha bo‘lgan Yevklid masofasidan R qiymatini ayirish orqali aniqlanadi. Uzunligi chekli va eni kichik bo‘lgan kesma ko‘rinishidagi qovurg‘a uchun esa “nuqta — qovurg‘a asosi” vektorining qovurg‘aning bo‘ylama (s) va ko‘ndalang (perp) o‘qlariga proyeksiyalari hisobga olinadi.

Agar nuqtaning qovurg‘aning bo‘ylama koordinatasi s bo‘yicha joylashuvi qovurg‘aning ruxsat etilgan oralig‘ida bo‘lsa va |perp| qovurg‘a enining yarmidan oshmasa, ushbu nuqta qovurg‘a sirtida joylashgan deb qabul qilinadi. Bunday holatda masofa nolga teng bo‘lib, nuqta harorati harorat profiliga muvofiq T_s qiymat bilan belgilanadi. Agar mazkur shart bajarilmasa, nuqtagacha bo‘lgan masofa qovurg‘aning eng yaqin qirrasigacha bo‘lgan Yevklid masofasi sifatida aniqlanadi. Bunda s koordinatasi avval [R, R+L] oralig‘ida chegaralanadi.

Hisoblash sohasi bo‘yicha har bir nuqta uchun ikkala issiqlik quvuri — oldingi va orqa qatordagi quvurlar — hamda ularga tegishli barcha qovurg‘alar ko‘rib chiqiladi. So‘ngra x va T_s qiymatlari nuqtaga eng yaqin joylashgan issiqlik manbaiga tegishli qiymatlar sifatida qabul qilinadi.

Issiqlik quvurlari bir qator bo‘ylab davriy joylashganligi sababli, qo‘shni quvurlar bilan bog‘liq simmetriyani to‘g‘ri hisobga olish uchun hisoblash sohasi quvurlar qatori yo‘nalishida uch marta takrorlanadi, ya’ni 3P davr hosil qilinadi. Keyingi tahlilda faqat markaziy davr hisobga olinadi. Bunday yondashuv birlik hisoblash yacheykasining chegarasi qo‘shni quvur o‘rniga noto‘g‘ri ravishda adiabatik devor sifatida ishlashidan kelib chiqadigan chekka effektni bartaraf etadi.

Hisoblashlar 0,3 mm qadamli bir tekis to‘rda amalga oshirildi. Markaziy davrning barcha nuqtalari uchun aniqlangan t(x) qiymatlari vaqtga bog‘liq erigan faza ulushining kumulyativ egri chizig‘ini hosil qiladi. Shu asosda har bir konstruktiv variant uchun t_{50}, t_{90}, t_{95} va t_{99} qiymatlari aniqlanadi.

Mazkur usulda vaqt bo‘yicha bosqichma-bosqich integrallash talab qilinmaydi. Shu sababli bitta konstruktiv variant uchun hisoblash bir necha soniya

ISSN 3030-3907

ichida bajarilishi mumkin. Aynan shu xususiyat ushbu yondashuvni tadqiqotda ko‘rib chiqilgan barcha variantlarga, jumladan keyingi bosqichlarda rad etilgan oraliq konstruksiyalarga ham qo‘llash imkonini berdi.

2-USUL: NOSTATSIONAR SONLI HISOBLASH.

1-usul natijalarini mustaqil tekshirish va vaqt davomida erish frontining real rivojlanishini aniqlash maqsadida fazaviy o‘tish hisobga olingan ikki o‘lchamli nostatsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi sonli ravishda yechildi.

Fazaviy o‘tish jarayonini hisobga olish uchun samarali yoki ko‘rinma issiqlik sig‘imi (Apparent Heat Capacity — AHC) usuli [11] qo‘llanildi. Mazkur yondashuvda erish harorati atrofidagi ΔT kenglikka ega tor temperatura oralig‘ida oddiy issiqlik sig‘imi o‘rniga yashirin erish issiqligini ham o‘z ichiga oluvchi samarali issiqlik sig‘imi kiritiladi:

$$c_{eff}(T) = \begin{cases} c_{qat}, & T < T_{er} - \delta_{mush}; \\ \frac{c_{qat}+c_{suy}}{2} + \frac{L_{yash}}{2\delta_{mush}}, & |T - T_{er}| \le \delta_{mush}; \\ c_{suy}, & T > T_{er} + \delta_{mush}. \end{cases} \quad (4)$$

Issiqlik o‘tkazuvchanlikning asosiy tenglamasi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\rho c_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = k_{suy}\nabla^2 T \quad (5)$$

Har bir vaqt qadamida Laplas operatorining besh nuqtali ayirmali sxemasi to‘rning barcha tugun nuqtalarida hisoblab chiqiladi.

$$\nabla^2 T_{i,j} \approx \frac{T_{i+1,j}+T_{i-1,j}+T_{i,j+1}+T_{i,j-1}-4T_{i,j}}{dx^2} \quad (6)$$

Hisoblash sohasi tashqi chegaralarida ko‘zguli (nol oqimli) chegara sharti qo‘llaniladi. Bu hisoblash yacheykasi chetida simmetriya tekisligi mavjudligiga mos keladi.

Quvur yoki qovurg‘a ichiga tushuvchi yacheykalar (1-usuldagi kabi aynan shu geometrik mezon asosida) har bir vaqt qadamida majburiy ravishda mos ravishda quvur uchun berilgan haroratga yoki qovurg‘a uchun berilgan haroratga o‘rnatiladi. Ya’ni, 1-tur chegaraviy shart to‘r chegarasida beriladigan shart sifatida emas, balki har bir integrallash qadamidan so‘ng hisoblash sohasi ichidagi qiymatlarni nuqtaviy tarzda mahkamlash (clamping) orqali amalga oshiriladi.
Bunday yondashuv manba (issiqlik manbai) shakli murakkab va hisoblash to‘riga moslashtirilmagan hollarda tabiiy hisoblanadi.

NATIJALAR.

Olingan natijalar bir-birini to‘ldiruvchi ikki xil ko‘rinishda taqdim etiladi. Dastlab umumlashtiruvchi jadval va grafik orqali amaliy jihatdan muhim bo‘lgan savolga — turli qovurg‘a konstruksiyalariga ega issiqlik akkumulyatorining 50 %, 90 % va deyarli to‘liq zaryadlanishi uchun qancha vaqt talab etilishiga — javob

ISSN 3030-3907

beriladi. Keyingi bosqichda esa erish frontining bevosita tasviri keltiriladi. Ushbu tasvir natijalarning qanday shakllanganini vizual tarzda tushuntirish imkonini beradi: har bir issiqlik quvuri va qovurg‘adan tarqalayotgan erish jarayoni hamda qarama-qarshi yo‘nalishdagi issiqlik to‘lqinlarining o‘zaro tutashishi ko‘rinadi. Aynan shu jarayonlar keyingi erish bosqichining sezilarli darajada tezlashishiga olib keladi.

1-jadvalda to‘rtta asosiy konstruktiv variant uchun erish jarayonining yakuniy vaqt ko‘rsatkichlari umumlashtirilgan. Hisoblashlar 3.2-bo‘limda bayon qilingan
1-usul asosida amalga oshirilgan. Bunda t_{50} — parafin hajmining 50 % qismi erigan paytdagi vaqtni, t_{90} va t_{95} mos ravishda 90 % va 95 % erish darajasiga erishish vaqtini, t_{99} esa amalda to‘liq zaryadlanishga, ya’ni hajm bo‘yicha 99 % parafinning erish holatiga mos keluvchi vaqtni ifodalaydi.

Erigan fazaning vaqt davomida o‘zgarishini tavsiflovchi to‘liq egri chiziq 2-rasmda keltirilgan. Erish frontining vaqt bo‘yicha rivojlanishi esa 3-rasmda ko‘rsatilgan bo‘lib, ushbu natijalar modellash bo‘limida tavsiflangan 2-usul, ya’ni sonli hisoblash asosida olingan.

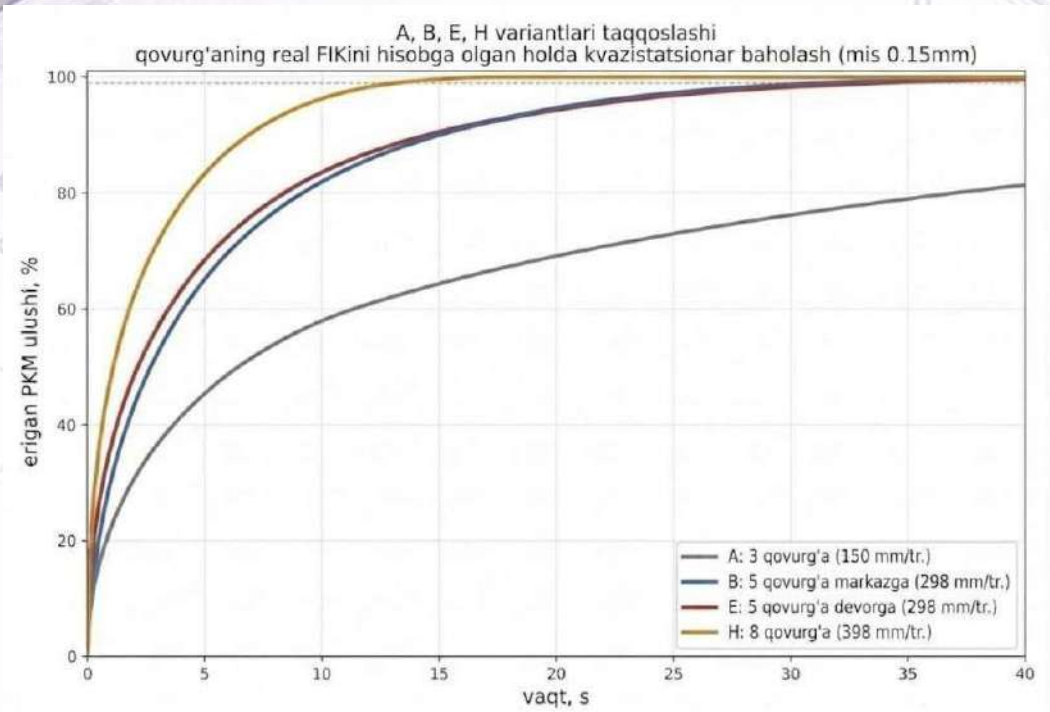
1-jadval. 50/90/95/99 % erishga ketayotgan erishish vaqti va bitta quvur uchun metall sarfi — 1-usul (qovurg‘aning haqiqiy FIK qiymati hisobga olingan kvazistatsionar baholash, mis qalinligi 0,15 mm).

Variant	**Metall, mm/tr.**	t_{50}, **soat**	t_{90}, **soat**	t_{95}, **soat**	t_{99}, **soat**
A	150	6,45	65,20	89,97	128,61
B	298	2,15	14,34	20,34	32,63
E	298	2,13	14,98	21,12	33,89
H	398	1,10	6,87	9,13	13,23

1-jadval ma’lumotlariga ko‘ra, turli konstruktiv variantlar orasidagi farq sezilarli darajada katta. Qovurg‘alari eng kam bo‘lgan A variantida deyarli to‘liq zaryadlanish (t_{99}) ga faqat 128,6 soatdan keyin erishiladi, ya’ni qurilmaning besh sutkadan ortiq uzluksiz ishlashi talab etiladi. 5 ta qovurg‘aga ega B va E variantlarida ushbu natijaga taxminan 33 soatda erishilib, bu bir sutkadan biroz ko‘proq vaqtni tashkil etadi. 8 ta qovurg‘a bilan jihozlangan H variantida esa zaryadlanish vaqti 13,2 soatgacha qisqaradi, ya’ni yarim sutkadan ham kam vaqt talab qilinadi.

Shunday qilib, bir xil issiqlik quvuri va o‘sha bir xil korpus konstruksiyasi saqlangan holda faqat qovurg‘alash geometriyasini o‘zgartirish orqali qurilmaning to‘liq zaryadlanish vaqtini qariyb 10 baravarga kamaytirish mumkinligi ko‘rinadi.

ISSN 3030-3907



2 rasm Vaqtga bog‘liq holda erigan parafin ulushi — A, B, E, H variantlari (1-usul). A varianti uchun hisoblash 128,6 soatgacha davom ettiriladi, shu sababli grafik 0–40 soatlik vaqt oralig‘i bilan cheklangan.

2-rasmdagi egri chiziqlar barcha variantlar uchun umumiy bo‘lgan muhim qonuniyatni yaqqol ko‘rsatadi: jarayonning dastlabki bosqichida erigan parafin ulushi tez sur’atlarda ortadi. Buning sababi erish frontining hali qizimagan va o‘zgarishsiz qolgan sovuq parafin qatlamlari tomon jadal siljishidir. Jarayonning yakuniy bosqichida esa egri chiziqlarning o‘sishi sezilarli darajada sekinlashadi.

Bunday holat erishning so‘nggi foizlari eng sekin kechishi bilan izohlanadi. Jarayon oxiriga kelib, qovurg‘alar va issiqlik quvurining qizdiruvchi yuzalari deyarli barcha tomondan issiq erigan parafin bilan o‘raladi. Natijada issiqlik manbaidan hali erimagan qismga uzatiladigan issiqlik oqimi kamayadi va erish jarayoni sekinlashadi.

Shu sababli 99 % erish darajasiga erishish vaqti 90 % darajaga nisbatan nomutanosib ravishda ortadi. Ya’ni, issiqlik akkumulyatorini to‘liq zaryadlashga yaqinlashtirish, uni dastlabki 50 % darajagacha zaryadlashga qaraganda ancha ko‘proq vaqt talab qiladi.

Erish frontining shakllanishi (sonli hisoblash)

3-rasmda 2-usul yordamida olingan natijalar keltirilgan. Bunda fazaviy o‘tish jarayonini hisobga oluvchi real ikki o‘lchamli nostatsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi uchun explicit hisoblash sxemasidan foydalanilgan. Hisoblash natijalari zaryadlanish boshlanganidan keyingi 1 va 3 soat uchun barcha to‘rtta variant bo‘yicha berilgan. Rasmlarda ko‘k rang hali qattiq holatda qolgan

ISSN 3030-3907

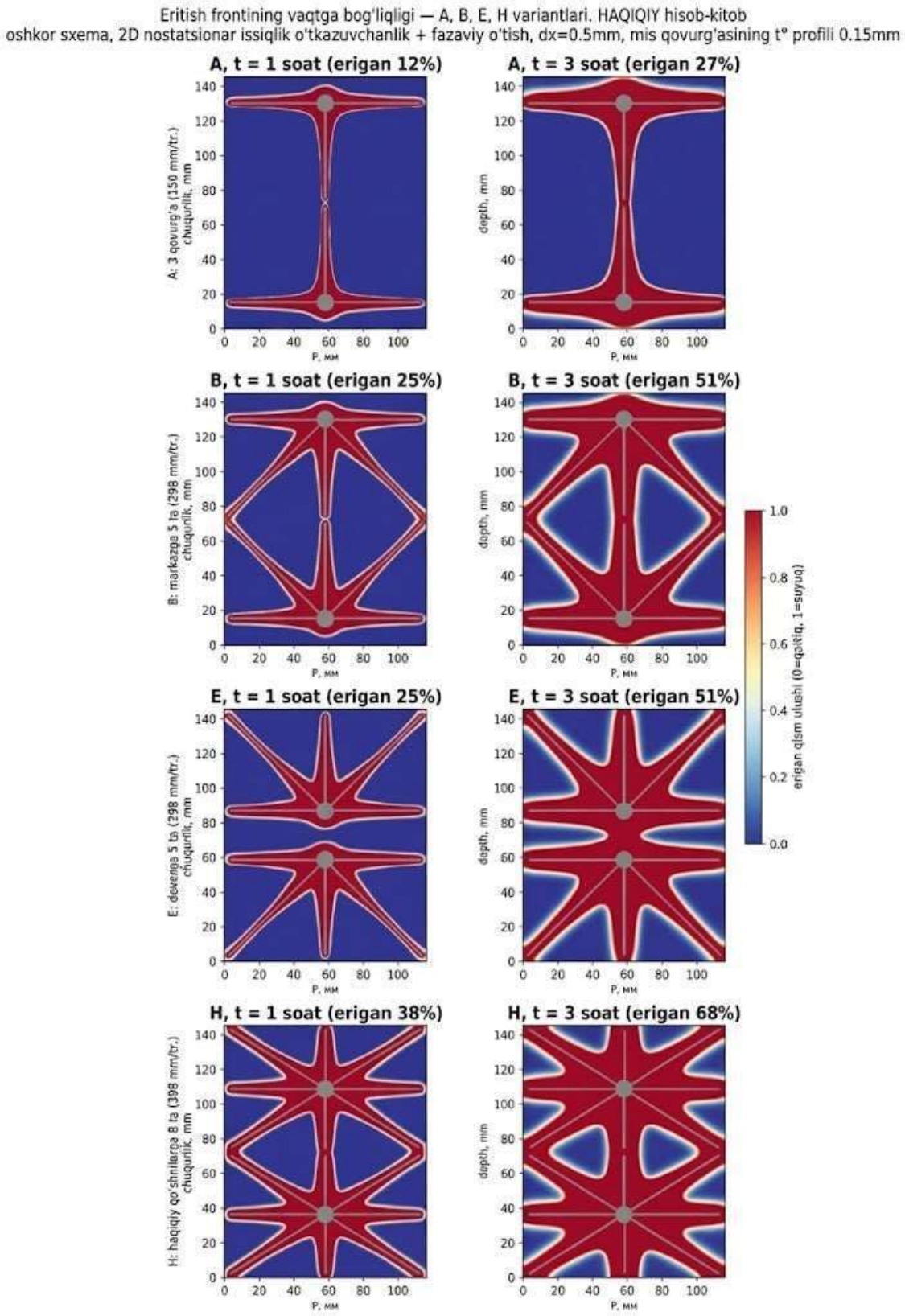
parafinni, qizil rang erigan parafinni, kulrang rang esa issiqlik quvuri va qovurg‘alar metallini ifodalaydi.

Erish jarayonining tasvirlarini taqqoslash orqali erish frontining shakllanishida variantlar o‘rtasidagi sifat jihatidan farqni ko‘rish mumkin. A variantida (3 ta qovurg‘a) har bir qovurg‘a atrofida alohida erigan zona shakllanib, ular taxminan ellips ko‘rinishini oladi. Uchta qovurg‘a orasida esa ko‘k rangdagi o‘ziga xos «bo‘yincha» — hali erimagan parafinning tor qatlami saqlanib qoladi. Mazkur soha qisqa vaqt ichida qovurg‘alardan yetarli issiqlik ololmaydi. Zaryadlanishning 3-soatiga kelib, umumiy hajmning atigi 27 % qismi erigan bo‘ladi.

B va E variantlarida (5 ta qovurg‘a) qo‘shni qovurg‘alar hosil qilgan alohida erish zonalari allaqachon 1 soat ichida bir-biri bilan tutashadi. Natijada deyarli bir xil, xochsimon («X» shaklidagi) erish sohasi yuzaga keladi. Bu holat quyida keltiriladigan xulosani — qovurg‘alarning qaysi tomonga yo‘naltirilganligi erish jarayoniga amalda katta ta’sir ko‘rsatmasligini — vizual jihatdan tasdiqlaydi. Har ikkala variantda ham 1 soatda erigan parafin ulushi 25 %, 3 soatda esa 51 % ni tashkil etadi.

H variantida (8 ta qovurg‘a) esa erigan zona 1 soatdayoq deyarli bir tekis taqsimlanib, hajmning 38 % qismini qamrab oladi. 3 soatdan keyin ushbu ko‘rsatkich 68 % ga yetadi. Qovurg‘alarning zichroq joylashuvi A variantida kuzatiladigan yirik «sovuq zonalar» yoki erimagan parafin to‘planmalarining shakllanishiga yo‘l qo‘ymaydi.

ISSN 3030-3907



3-rasm. 1 va 3 soatlik zaryadlanishdan keyingi parafinning erish fronti — nostatsionar sonli hisoblash natijalari

B va E variantlarida bitta issiqlik quvuriga **298 mm** miqdorida metall sarflangan bo‘lib, har ikkala konstruksiyada ham 5 ta qovurg‘adan foydalanilgan. Ular orasidagi asosiy farq qovurg‘alar tizimining yo‘nalishidadir: B variantida

ISSN 3030-3907

diagonal qovurg‘alar qarama-qarshi qatordagi issiqlik quvurlari tomon yo‘naltirilgan, E variantida esa qovurg‘alar tizimi 180° ga burilib, korpusning eng yaqin devori tomon qaratilgan. Bunda quvur qatorlari korpus markaziga yaqinlashtirilgan. Ushbu ikki variantning to‘liq zaryadlanish vaqtidagi farqi mos ravishda 33,89 va 32,63 soatni tashkil etadi, ya’ni tafovut 4 % dan kichik. Bu qiymat modelning hisoblash aniqligi doirasida bo‘lib, amaliy jihatdan sezilarli farq kuzatilmaydi.

Demak, qovurg‘alar soni, uzunligi va yo‘nalish burchaklari bir xil bo‘lgan sharoitda qovurg‘alar tizimining qo‘shni quvur yoki korpus devori tomon yo‘naltirilishi zaryadlanish davomiyligiga deyarli ta’sir ko‘rsatmaydi. Shu sababli ushbu konstruktiv parametrni issiqlik samaradorligidan ko‘ra, yig‘ish va ishlab chiqarish qulayligini hisobga olgan holda tanlash mumkin. Bunda asosiy issiqlik-texnik omil qovurg‘a uchining eng yaqin sovuq sirtgacha bo‘lgan masofasidir. Bunday sirt qo‘shni qovurg‘a, korpus devori yoki boshqa issiqlik quvuri bo‘lishi mumkin.

A variantidagi 3 ta qovurg‘adan (150 mm/quvur) B va E variantlaridagi 5 ta qovurg‘aga (298 mm/quvur, metall sarfi +99 %) o‘tish natijasida to‘liq zaryadlanish vaqti taxminan 3,9 baravarga qisqarib, 128,6 soatdan qariyb 33 soatgacha kamayadi. Boshqacha aytganda, qovurg‘alarga sarflanadigan metall miqdori deyarli ikki baravar oshirilganda, zaryadlanish jarayoni qariyb besh baravar tezlashadi. Keyingi bosqichda esa geometrik jihatdan to‘g‘ri yo‘naltirilgan 8 ta qovurg‘ali H varianti (398 mm/quvur) qo‘llanganda, B/E variantlariga nisbatan metall sarfi yana 34 % ga oshadi, biroq zaryadlanish vaqti qo‘shimcha ravishda 2,5 baravarga qisqarib, 13,2 soatni tashkil etadi.

Ushbu natijalar qovurg‘alar soni ortishi bilan qo‘shimcha metall sarfining har bir birligiga to‘g‘ri keladigan issiqlik-texnik samaradorlikning pasayishini ko‘rsatadi. Shunga qaramay, 8 qovurg‘ali zich kompakt sxemaga o‘tilganda ham qo‘shimcha qovurg‘alash sezilarli natija beradi. Bu holat Yang va boshqalar [7] tomonidan qobiq-quvurli modul uchun olingan natijalar bilan sifat jihatidan mos keladi: qovurg‘alar sonini oshirish erish jarayonini tezlashtiradi, biroq qo‘shimcha qovurg‘alarning chegaraviy samarasi pasayib boradi va natija ularning o‘zaro geometrik joylashuviga kuchli bog‘liq bo‘ladi. Shu sababli qovurg‘alar sonini shunchaki ko‘paytirish har doim ham xuddi shunday yuqori samaradorlikni ta’minlamaydi; ularning fazoviy joylashuvi ham muhim konstruktiv omil hisoblanadi.

Qovurg‘alarning joylashuvi metall miqdoridan ham muhimroq bo‘lishi mumkinligini H variantini ishlab chiqish jarayoni yaqqol ko‘rsatadi. Dastlabki bosqichda diagonal qovurg‘alar geometrik jihatdan qulay bo‘lgan 45° burchak ostida joylashtirilgan. Bunday yondashuv quvurlar qatoridagi qadam P va

ISSN 3030-3907

qatorlararo masofa **Δy** o‘zaro teng deb qabul qilingan holatga mos keladi. A va B variantlarida bu shartga yaqin holat kuzatilsa, H variantida quvur qatori geometriyasi allaqachon bundan sezilarli farq qiladi.

45° burchak asosida tuzilgan ikkita oraliq variantning hisoblash natijalari quyidagicha bo‘lgan: birinchi holatda bitta quvurga 232 mm metall sarflanganda to‘liq zaryadlanish vaqti 29,8 soat, ikkinchi holatda esa 306 mm/quvur metall sarfi bilan 25,8 soat ni tashkil etgan (5-rasm). Har ikkala oraliq konstruksiya yakuniy H variantidan **(398 mm/quvur, 13,2 soat)** ancha past natija ko‘rsatgan. Xususan, metall sarfi 306 mm/quvur bo‘lgan oraliq variant H variantiga nisbatan atigi taxminan 30 % kam metall talab qilsa-da, uning zaryadlanish vaqti deyarli ikki baravar uzun.

Shunday qilib, oraliq variantlarda qo‘shimcha sarflangan metall qovurg‘alarning issiqlik almashinuvi nuqtayi nazaridan optimal yo‘nalishga ega bo‘lmaganligi sababli yetarli darajada samarali ishlatilmagan. Ya’ni, qovurg‘alar geometrik jihatdan eng yaqin qo‘shni issiqlik quvuri tomon emas, balki undan chetroq yo‘nalishga qaratilgan. Bu natija qovurg‘alash samaradorligini belgilashda faqat metall miqdori yoki qovurg‘alar soni emas, balki ularning haqiqiy geometrik nishonlanishi va eng yaqin issiqlik almashinuvi sirtlariga nisbatan joylashuvi ham hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatadi.

XULOSA.

Issiqlik akkumulyatorining zaryadlanish tezligini belgilovchi asosiy konstruktiv omillar sifatida qovurg‘aning qalinligi, qovurg‘alar soni va ularning fazoviy joylashuv aniqligini ko‘rsatish mumkin. Tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, ushbu omillar orasida qovurg‘alarning issiqlik almashinuvi zonasiga nisbatan to‘g‘ri yo‘naltirilishi alohida ahamiyatga ega. Bunga qarama-qarshi ravishda, qovurg‘alar tizimining umumiy yo‘nalishini 180° ga burish zaryadlanish jarayoniga sezilarli ta’sir ko‘rsatmaydi. Tadqiqot natijalari asosida asosiy xulosalar quyidagicha ifodalanadi.

1. Qovurg‘a qalinligi zaryadlanish jarayonining muhim parametrlaridan biridir. 0,15 mm qalinlikdagi mis lentadan tayyorlangan yupqa qovurg‘aning haqiqiy issiqlik samaradorligi xuddi shu uzunlikdagi 0,5 mm qalinlikdagi mis qovurg‘aga nisbatan ancha past. Uzunligi 50 mm bo‘lgan qovurg‘alar uchun ushbu ko‘rsatkichlar mos ravishda 57 % va 80 %, 74 mm uzunlikdagi qovurg‘alar uchun esa 41 % va 65 % ni tashkil etadi. Demak, yupqa qovurg‘ada uning asosiy qismiga uzatilgan issiqlikning uchdan bir qismidan ko‘prog‘i qovurg‘aning uzoq uchiga to‘liq harorat napori bilan yetib bormaydi. Shuning uchun qovurg‘a qalinligini faqat konstruktiv jihatdan ikkilamchi parametr sifatida qarash mumkin emas. Mazkur parametr qovurg‘a bo‘ylab harorat taqsimotiga va natijada parafinning erish davomiyligi bo‘yicha hisoblangan qiymatlarga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

ISSN 3030-3907

2. Qovurg‘alar tizimining umumiy yo‘nalishi zaryadlanish tezligiga juda kam ta’sir qiladi. Bir xil geometrik parametrlarga ega qovurg‘alar majmuasini 180° ga burish, ya’ni B variantidan E variantiga o‘tish, 99 % erigan parafin holatiga erishish vaqtini 4 % dan kam miqdorda o‘zgartiradi. Ko‘rib chiqilgan geometrik sxema uchun bu omil qovurg‘alar soni, uzunligi va yo‘nalish burchagiga nisbatan ikkilamchi ahamiyatga ega. Shu sababli konstruksiyani loyihalashda qovurg‘alar fanining umumiy yo‘nalishini yig‘ish qulayligi yoki qo‘shni issiqlik quvurlarining joylashuvi asosida tanlash mumkin. Bunday o‘zgarish zaryadlanish tezligining sezilarli darajada pasayishiga olib kelmaydi.

3. Qovurg‘alar sonining ortishi zaryadlanish jarayonini tezlashtiradi, biroq qo‘shimcha samaradorlik bosqichma-bosqich kamayadi. Qovurg‘alar sonini oshirish zaryadlanish davomiyligiga chiziqli bo‘lmagan, ammo ijobiy ta’sir ko‘rsatadi. Jumladan, 3 ta qovurg‘adan 5 ta qovurg‘aga o‘tish natijasida to‘liq zaryadlanish vaqti taxminan 3,9 baravarga qisqaradi, bunda bitta quvurga to‘g‘ri keladigan metall sarfi 99 % ga ortadi. Qovurg‘alar sonini 5 tadan 8 tagacha oshirish va ularni geometrik jihatdan optimal yo‘naltirish esa zaryadlanish vaqtini yana taxminan 2,5 baravarga kamaytiradi, biroq bu bosqichda metall sarfining qo‘shimcha o‘sishi atigi 34 % ni tashkil etadi.

Shunday qilib, qovurg‘alar sonini oshirish orqali zaryadlanish tezligini yaxshilash mumkin, ammo qo‘shimcha metall sarfining har bir birligiga to‘g‘ri keladigan samaradorlik asta-sekin pasayib boradi. Biroq 8 ta qovurg‘ali konstruksiyada ham ushbu imkoniyat to‘liq tugamaganligi kuzatiladi, ya’ni qovurg‘alar sonini oqilona oshirish orqali issiqlik akkumulyatorining zaryadlanish vaqtini yanada qisqartirish uchun konstruktiv zaxira mavjud.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23, No. 3. P. 251–283.
2. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, No. 2. P. 318–345.
3. Rashidi S., Shamsabadi H., Esfahani J.A., Harmand S. A review on potentials of coupling PCM storage modules to heat pipes and heat pumps // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 140, No. 4. P. 1655–1713.
4. Wołoszyn J., Szopa K. A combined heat transfer enhancement technique for shell-and-tube latent heat thermal energy storage // Renewable Energy. 2023. Vol. 202. P. 1342–1356.
5. Singh S., Iqbal Md. Z. A Review on Effect of Geometric Parameter of Shell and Tube on PCM in Latent Thermal Energy Storage // International Journal of

ISSN 3030-3907

Innovations in Science, Engineering and Management. 2026. Vol. 5, No. 1. P. 146–150.
6. Zhang Y., Wang Z., Lu B., Luo M. Effect of fin length and angle on the melting process of phase change materials in vertical latent heat storage unit // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2023. Vol. 237, No. 8. P. 1842–1855.
7. Yang X., Wang X., Liu Z., Luo X., Yan J. Effect of fin number on the melting phase change in a horizontal finned shell-and-tube thermal energy storage unit // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2022. Vol. 236. Art. 111527.
8. Guo J., Wang X., Yang B., Yang X., Li M.-J. Thermal assessment on solid-liquid energy storage tube packed with non-uniform angled fins // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2022. Vol. 236. Art. 111526.
9. Pizzolato A., Sharma A., Maute K., Sciacovelli A., Verda V. Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization // Applied Energy. 2017. Vol. 208. P. 210–227.
10. Voller V., Cross M. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981. Vol. 24, No. 3. P. 545–556.
11. Jamal-Abad M.T., Martínez A., Carmona M., Cortés C. Numerical analysis of solidification of paraffin-type PCMs by using customary fixed-grid methods // Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 114. Art. 115799.
12. Haque M.N., Akter R., Mojumder M.S.H. An Efficient Explicit Scheme for Solving the 2D Heat Equation with Stability and Convergence Analysis // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2025. Vol. 13, No. 7. P. 2234–2244.
13. Ji C., Qin Z., Dubey S., Choo F.H., Duan F. Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a rectangular enclosure induced by natural convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 127, Part C. P. 255–265.
14. Sun X., Zhang Q., Medina M.A., Lee K.O. Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid–liquid phase change materials (PCMs) // Applied Energy. 2015. Vol. 148. P. 223–232.
16. Trp A. An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit // Solar Energy. 2005. Vol. 79, No. 6. P. 648–660.
17. Himran S., Suwono A., Mansoori G.A. Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium // Energy Sources. 1994. Vol. 16, No. 1. P. 117–128.

ISSN 3030-3907

18. Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Хадзарагова Е.А., Алкацев М.И. Исследование теплофизических и эксплуатационных свойств теплоаккумулирующих материалов на основе парафинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11-1. С. 6–17.
19. ГОСТ 23683-89. Парафины нефтяные твёрдые. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.
20. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергоиздат, 1981.
21. Alexiades V., Solomon A.D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes. — Washington: Hemisphere Publishing, 1993.

ISSN 3030-3907