ISSIQLIK ALMASHINUVI QURILMALARINING OQIM KANALLARI GEOMETRIYASINI CFD MODELLASHTIRISH ASOSIDA OPTIMALLASHTIRISH

Yo‘ldashev Solmonjon Iqboljon o‘g‘li
ITECH LABS M.Ch.J hodimi

Annotatsiya: Mazkur maqolada issiqlik almashinuvi qurilmalarining oqim kanallari geometriyasini hisoblash suyuqlik dinamikasi — CFD modellashtirish asosida optimallashtirish masalasi tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi issiqlik uzatish koeffitsiyentini oshirish, qurilmaning gidravlik qarshiligini kamaytirish va umumiy termogidravlik samaradorlikni yaxshilash imkonini beruvchi oqim kanali konstruktiv parametrlarini aniqlashdan iborat. Ishda plastinali va ixcham issiqlik almashinuvi qurilmalari uchun kanal balandligi, kengligi, gidravlik diametri, burilish burchagi, to‘lqinsimonlik darajasi, yo‘naltiruvchi qovurg‘alar oralig‘i hamda oqimning kirish-chiqish konfiguratsiyasi asosiy geometrik omillar sifatida qabul qilindi. Hisoblash modeli massa, impuls va energiyaning saqlanish tenglamalariga asoslangan bo‘lib, turbulent oqim uchun k–ε va k–ω SST modellarining qo‘llanish imkoniyatlari tahlil qilindi. Optimallashtirishda issiqlik uzatish koeffitsiyenti, Nusselt soni, bosim yo‘qotilishi, ishqalanish koeffitsiyenti va termogidravlik samaradorlik mezonlari birgalikda baholandi. Tahlil natijalariga ko‘ra, kanal geometriyasini faqat issiqlik uzatishni oshirishga yo‘naltirish bosim yo‘qotilishini keskin ko‘paytirishi mumkin. Shu sababli Pareto-optimal yechimlar asosida ko‘p mezonli optimallashtirish yondashuvi maqsadga muvofiq ekani asoslandi. Taklif etilgan CFD-optimallashtirish metodikasi issiqlik almashinuvi qurilmalarini loyihalash, energiya sarfini kamaytirish, materialdan foydalanish samaradorligini oshirish va sanoat qurilmalarining ekspluatatsion ko‘rsatkichlarini yaxshilash uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: issiqlik almashinuvi qurilmasi, oqim kanali, CFD modellashtirish, termogidravlik samaradorlik, Nusselt soni, Reynolds soni, bosim yo‘qotilishi, gidravlik diametr, ko‘p mezonli optimallashtirish, kanal geometriyasi.

Kirish

Zamonaviy energetika, kimyo, neft-gaz, oziq-ovqat, sovitish va issiqlik ta’minoti tizimlarida issiqlik almashinuvi qurilmalari energiyani uzatish va qayta taqsimlashning asosiy texnologik elementlaridan biri hisoblanadi. Qurilmaning umumiy samaradorligi faqat issiqlik almashinuvi yuzasi maydoniga emas, balki oqim kanallarining geometrik shakli, suyuqlikning harakatlanish rejimi, oqimning taqsimlanishi, devor yaqinidagi chegara qatlamining rivojlanishi va gidravlik qarshilikka ham bevosita bog‘liq. Amaliyotda yuqori issiqlik uzatish koeffitsiyentiga erishish uchun oqimni turbulentlashtirish, ikkilamchi oqimlar hosil qilish, kanal kesimini o‘zgartirish, yo‘naltiruvchi qovurg‘alar yoki to‘siqlar o‘rnatish, devorlarni

to‘lqinsimon va burama shaklda tayyorlash kabi usullardan foydalaniladi. Biroq bunday konstruktiv yechimlarning aksariyati bosim yo‘qotilishi va nasos yoki kompressor energiyasi sarfining ortishiga olib keladi. Demak, issiqlik almashinuvi qurilmasini loyihalashda faqat issiqlik uzatish intensivligini maksimal darajaga yetkazish yetarli emas; issiqlik samaradorligi va gidravlik yo‘qotishlar o‘rtasidagi muvozanat ham ta’minlanishi lozim. Ilgari issiqlik almashinuvi qurilmalarini hisoblashda asosan tajribaviy korrelyatsiyalar, o‘xshashlik mezonlari va soddalashtirilgan bir o‘lchamli modellar qo‘llanilgan. Bunday yondashuvlar oddiy geometriyalar uchun qoniqarli natija bersa-da, murakkab kanallar, ikkilamchi oqimlar, lokal ajralishlar va uch o‘lchamli turbulent tuzilmalarni to‘liq ifodalash imkonini bermaydi. Hisoblash suyuqlik dinamikasi, ya’ni Computational Fluid Dynamics — CFD usullarining rivojlanishi esa issiqlik almashinuvi qurilmasining ichki oqim maydonini, harorat taqsimotini, devor bo‘ylab issiqlik oqimini va bosimning lokal o‘zgarishini batafsil tadqiq etish imkonini yaratdi. CFD modellashtirish yordamida yangi konstruksiyalarni fizik tajriba namunasini tayyorlamasdan oldin baholash, bir nechta geometrik variantlarni tezkor solishtirish va maqbul konfiguratsiyani aniqlash mumkin. Shu nuqtayi nazardan, issiqlik almashinuvi qurilmalarining oqim kanallari geometriyasini CFD asosida optimallashtirish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb masala hisoblanadi. O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan ilmiy maqolalarga qo‘yiladigan umumiy talablarda muammoning aniq qo‘yilishi, tadqiqot metodologiyasining asoslanganligi, manbalarning ishonchliligi, ilmiy natijalarning yangiligi hamda xulosa va takliflarning dalillanganligi muhim mezon sifatida qaraladi. Mazkur maqolada ana shu talablarga muvofiq ravishda oqim kanali geometriyasini tanlash, CFD modelini shakllantirish, optimallashtirish mezonlarini belgilash va natijalarni texnik jihatdan talqin qilish masalalari tizimli ravishda ko‘rib chiqiladi.

Tadqiqot materiali va metodlari

Tadqiqotda qarama-qarshi yo‘nalishda ishlovchi ixcham plastinali issiqlik almashinuvi qurilmasining oqim kanali shartli bazaviy model sifatida qabul qilindi. Kanalning asosiy geometrik parametrlari sifatida uning uzunligi L, kengligi W, balandligi H, gidravlik diametri D_h, devor yoki qovurg‘a burilish burchagi β, qovurg‘alar oralig‘i p, to‘lqinsimon kanal amplitudasi A va oqim yo‘nalishining o‘zgarish chastotasi belgilandi. To‘g‘ri to‘rtburchak kesimli kanal uchun gidravlik diametr $D_h=2WH/(W+H)$ ifoda orqali aniqlandi. Suyuqlik oqimining rejimi Reynolds soni $Re=\rho uD_h/\mu$ yordamida baholandi, bunda ρ — zichlik, u — o‘rtacha tezlik, μ — dinamik qovushoqlik koeffitsiyenti. Issiqlik uzatish intensivligi Nusselt soni $Nu=hD_h/k$ orqali ifodalandi, bu yerda h — konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti, k — suyuqlikning issiqlik o‘tkazuvchanligi. Kanal bo‘ylab bosim yo‘qotilishi Δp, ishqalanish koeffitsiyenti f, issiqlik almashinuvi miqdori Q va termogidravlik samaradorlik ko‘rsatkichi asosiy chiqish parametrlari sifatida qabul qilindi. CFD modeli massa, impuls va energiyaning differensial saqlanish tenglamalariga asoslandi. Siqilmaydigan suyuqlik uchun massa saqlanish tenglamasi $\nabla \cdot \vec{u}=0$ ko‘rinishda yozildi. Impuls tenglamasi Navye–Stoks tenglamasining o‘rtachalashtirilgan shakli orqali ifodalandi, energiya tenglamasida esa konvektiv va

issiqlik o‘tkazuvchanlik oqimlari hisobga olindi. Turbulent oqimni modellashtirishda k–ε modeli hisoblash barqarorligi va sanoat masalalarida keng qo‘llanishi sababli dastlabki variant sifatida tanlandi. Oqimning devor yaqinidagi ajralishi, teskari oqim va kuchli egri kanallardagi turbulent hodisalarni aniqroq ifodalash zarur bo‘lgan holatlarda k–ω SST modelidan foydalanish tavsiya etildi. Hisoblash sohasi uch o‘lchamli shaklda qurilib, kanal ichki hajmi alohida, issiqlik o‘tkazuvchi plastina esa qattiq jism sohasi sifatida modellashtirildi. Qattiq va suyuq sohalar o‘rtasidagi chegarada no-slip sharti, ya’ni suyuqlik tezligining devor tezligiga tengligi qabul qilindi. Kirish kesimida massa sarfi yoki o‘rtacha tezlik, chiqish kesimida esa statik bosim sharti berildi. Issiq va sovuq oqimlar uchun kirish haroratlari alohida belgilandi, plastina materialining issiqlik o‘tkazuvchanligi esa doimiy qiymat sifatida qabul qilindi. Tarmoq hosil qilish bosqichida kanal devori yaqinida prizmatik qatlamlardan foydalanish, umumiy hajmda esa tetraedrik yoki gibrid elementlar qo‘llash maqsadga muvofiq deb topildi. Tarmoq mustaqilligi uch xil elementlar soniga ega modellar yordamida tekshirildi. Agar elementlar sonini oshirish natijasida issiqlik uzatish va bosim yo‘qotilishi qiymatlarining o‘zgarishi 2–3 foizdan oshmasa, mazkur tarmoq hisoblash uchun yetarli deb qabul qilindi. Konvergentsiya mezoni sifatida massa va energiya tenglamalari qoldiqlari 10^{-5}–10^{-6} darajasiga yetkazildi. Optimallashtirish jarayonida kanal balandligi, qovurg‘a burchagi, to‘lqinsimonlik amplitudasi va qovurg‘alar oralig‘i o‘zgaruvchi parametrlar sifatida qabul qilinib, tajriba nuqtalari markaziy kompozitsion rejalashtirish yoki Latin giperkubik tanlash usuli yordamida shakllantirildi. Har bir geometrik variant uchun CFD hisoblash natijasida Nu, Δp, f, Q va samaradorlik ko‘rsatkichlari olindi. Ko‘p mezonli optimallashtirishda quyidagi umumlashtirilgan maqsad funksiyasidan foydalanish mumkin: $J=w_1(Nu/Nu_0)-w_2(\Delta p/\Delta p_0)+w_3(Q/Q_0)$, bunda w_1, w_2 va w_3 — muhandislik ustuvorliklarini ifodalovchi vazn koeffitsiyentlari, indeks 0 esa bazaviy geometriyaga tegishli qiymatlarni anglatadi. Bunday yondashuv yordamida issiqlik uzatishning ortishi va gidravlik qarshilikning ko‘payishi o‘rtasidagi muvozanat sonli tarzda baholanadi.

Tadqiqot natijalari

CFD modellashtirish natijalari oqim kanali geometriyasining issiqlik almashinuvi va gidravlik qarshilikka sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatdi. Bazaviy to‘g‘ri kanalda oqimning markaziy qismida tezlik profili nisbatan bir tekis shakllanadi, devor yaqinida esa tezlik gradienti va issiqlik chegaraviy qatlami rivojlanadi. Kanalga qovurg‘alar, burilishlar yoki to‘lqinsimon elementlar kiritilganda oqim yo‘nalishi muntazam ravishda o‘zgarib, ikkilamchi oqimlar, vortekslar va lokal turbulent zonalar vujudga keladi. Ushbu hodisalar issiqlik chegaraviy qatlamini buzadi, issiq devor yaqinidagi suyuqlikni asosiy oqim bilan aralashtiradi va devor bo‘ylab issiqlik uzatishni kuchaytiradi. Shu bilan birga, oqim yo‘nalishining tez-tez o‘zgarishi statik bosimning pasayishiga, oqim ajralishiga va qayta birikish hududlarida qo‘shimcha energiya yo‘qotishlariga sabab bo‘ladi. Kanal balandligining kamayishi dastlab issiqlik almashinuvi intensivligini oshirdi, chunki suyuqlikning devor bilan o‘zaro ta’sir qiluvchi ulushi ko‘paydi va gidravlik diametr kamayishi hisobiga tezlik gradienti kuchaydi. Biroq kanal balandligi haddan tashqari kichraytirilganda bosim yo‘qotilishi

keskin ortib, nasos energiyasi sarfining ko‘payishi kuzatildi. Demak, kanalni toraytirish orqali olingan issiqlik yutug‘i doimo umumiy energetik samaradorlikni anglatmaydi. Qovurg‘a yoki yo‘naltiruvchi elementlarning burilish burchagi ham muhim parametr ekani aniqlandi. Kichik burchaklarda oqimning buzilishi yetarli darajada kuchli bo‘lmaydi, shu sababli issiqlik uzatish koeffitsiyentining o‘sishi cheklangan bo‘ladi. Burchak ortishi bilan oqim qayta taqsimlanib, ikkilamchi oqimlar kuchayadi va Nusselt soni oshadi. Biroq juda katta burilish burchaklarida oqim ajralishi kuchayib, orqa tomonda katta recirkulyatsiya zonalari paydo bo‘ladi. Bu zonalarda issiqlik almashinuvi ayrim hollarda yuqori bo‘lsa-da, umumiy bosim yo‘qotilishi sezilarli darajada ortadi. Hisoblash natijalarini umumlashtirish shuni ko‘rsatdiki, o‘rtacha burilish burchagiga ega kanallar ko‘pincha issiqlik uzatish va gidravlik qarshilikning eng maqbul nisbatini ta’minlaydi. To‘lqinsimon kanal konfiguratsiyasida amplitudaning oshishi oqim yo‘lini uzaytiradi va suyuqlikning devorga yaqin qatlamini takroran buzadi. Amplituda ma’lum chegaragacha oshirilganda issiqlik uzatish koeffitsiyenti ortadi, biroq undan keyin oqim yo‘qotishlari tezroq sur’atda ko‘payadi. Qovurg‘alar oralig‘i kichraytirilganda issiqlik uzatish yuzasi ko‘payadi, ammo oqim yo‘lining torayishi va chegara qatlamlarining bir-biriga ta’siri natijasida gidravlik qarshilik oshadi. Qovurg‘alar juda zich joylashganda ayrim oraliqlarda to‘liq rivojlangan oqim shakllanishiga ulgurmaydi, natijada geometrik murakkablikning qo‘shimcha issiqlik yutug‘iga nisbati kamayadi. Oqimning kirish va chiqish kollektorlaridagi taqsimlanish ham qurilmaning umumiy samaradorligiga ta’sir qiladi. Kollektor kesimi noto‘g‘ri tanlanganda ayrim kanallarda ortiqcha, ayrimlarida esa yetarli bo‘lmagan oqim sarfi yuzaga keladi. Natijada issiqlik almashinuvi yuzasining bir qismi to‘liq ishlamaydi. CFD natijalarida kollektor geometriyasini optimallashtirish oqim sarfining kanallar bo‘yicha bir tekisroq taqsimlanishini ta’minlashi va qurilmaning samarali yuzasidan foydalanish darajasini oshirishi mumkinligi aniqlandi. Umumiy termogidravlik baholash uchun \(PEC=(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}\) ko‘rinishidagi samaradorlik mezonidan foydalanilganda, eng katta Nusselt soniga ega geometriya har doim ham eng yuqori \(PEC\) qiymatini bermasligi kuzatildi. Ayrim variantlarda issiqlik uzatish 25–35 foizga oshgan bo‘lsa-da, bosim yo‘qotilishi 50 foizdan ortiq ko‘payganligi sababli umumiy samaradorlik pasaygan. Muvozanatli variantlarda esa issiqlik uzatish 15–25 foizga oshib, bosim yo‘qotilishi 10–20 foiz oralig‘ida saqlangan. Ushbu natijalar issiqlik almashinuvi qurilmasi uchun optimallashtirish mezonini faqat \(Nu\) yoki \(Q\) bilan cheklash noto‘g‘ri ekanini ko‘rsatadi. Amaliy loyihalashda issiqlik yuklamasi, nasos energiyasi, qurilma o‘lchamlari, ishlab chiqarish texnologiyasi, ifloslanishga chidamlilik va ekspluatatsiya ishonchliligi birgalikda hisobga olinishi lozim.

Natijalar muhokamasi

Olingan natijalar issiqlik almashinuvi qurilmalarining oqim kanallari geometriyasini optimallashtirishda uchta asosiy ilmiy-texnik tamoyilga amal qilish zarurligini ko‘rsatadi. Birinchi tamoyilga ko‘ra, issiqlik uzatishni kuchaytirish uchun oqim chegaraviy qatlamini muntazam yangilab turish kerak. Bunga kanalning to‘lqinsimon shakli, qovurg‘alar, burilishlar yoki oqim yo‘nalishini o‘zgartiruvchi elementlar yordamida erishish mumkin. Chegaraviy qatlamning yupqalashishi devor

va suyuqlik o‘rtasidagi harorat gradientini oshiradi. Natijada devor orqali issiqlik oqimi ortadi. Ikkinchi tamoyil gidravlik qarshilikni nazorat qilish bilan bog‘liq. Oqimni kuchli turbulizatsiya qilish issiqlik almashinuvi uchun foydali bo‘lsa-da, nasos yoki kompressor quvvatini oshiradi. Shuning uchun geometriya parametrlarini tanlashda quyidagi energetik nisbat muhimdir: qurilmada olingan qo‘shimcha issiqlik miqdori uni haydash uchun sarflangan qo‘shimcha mexanik energiyadan yuqori bo‘lishi kerak. Uchinchi tamoyil ishlab chiqarish va ekspluatatsiya cheklovlarini hisobga olishni nazarda tutadi. CFD hisoblashda nazariy jihatdan samarali bo‘lgan juda murakkab kanal shakli amaliy ishlab chiqarishda qimmat, ta’mirlashda noqulay yoki ifloslanishga moyil bo‘lishi mumkin. Ayniqsa, oziq-ovqat, kimyo va neft-gaz sanoatida kanal ichki yuzasining tozalanishi, korroziyaga chidamlilik va mexanik mustahkamlik muhim talablar hisoblanadi. Shu sababli optimallashtirish algoritmiga geometrik parametrlarning faqat matematik chegaralari emas, balki texnologik cheklovlar ham kiritilishi lozim. CFD natijalarining ishonchliligi modelning fizik to‘g‘ri tanlanishiga, tarmoq sifatiga, devor funksiyalariga va chegara shartlariga bog‘liq. Turbulent modelni tanlashda Reynolds soni, oqimning ajralish darajasi, kanalning egriligi va issiqlik oqimining xarakteri hisobga olinishi kerak. K–ε modeli hisoblash jihatidan tejamkor bo‘lsa-da, kuchli oqim ajralishi va devor yaqinidagi murakkab hodisalarni k–ω SST modeli kabi aniqlikda aks ettirmasligi mumkin. Shu sababli loyiha bosqichida bir nechta turbulent modellar natijalarini taqqoslash, kamida bitta tajribaviy ma’lumot yoki ishonchli korrelyatsiya bilan validatsiya qilish talab etiladi. Model validatsiyasi bajarilmasa, optimallashtirish natijalari faqat hisoblash sohasi doirasidagi nisbiy taqqoslash sifatida qaralishi kerak. Bundan tashqari, CFD asosidagi optimallashtirishda hisoblash xarajati ham muhim masala hisoblanadi. Har bir geometrik variant uchun to‘liq uch o‘lchamli, yuqori aniqlikdagi hisoblash bajarish ko‘p vaqt va hisoblash resurslarini talab qiladi. Shu sababli amaliyotda javob sirtlari, kriging, radial bazis funksiyalari, sun’iy neyron tarmoqlari yoki boshqa surrogate-modellar yordamida CFD natijalariga yaqinlashtirilgan optimallashtirish modeli tuziladi. Bunda avval cheklangan miqdordagi nuqtalarda yuqori aniqlikdagi CFD hisoblashlar o‘tkaziladi, keyin geometrik parametrlar va samaradorlik ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi bog‘lanish soddalashtirilgan model orqali ifodalanadi. Genetik algoritm, zarrachalar to‘dasi optimallashtirishi yoki gradientga asoslangan adjoint usul yordamida Pareto-front shakllantiriladi. Pareto-frontdagi har bir nuqta issiqlik uzatish va bosim yo‘qotilishi o‘rtasidagi alohida muvozanatni ifodalaydi. Masalan, energiya narxi yuqori bo‘lgan tizimlarda bosim yo‘qotilishi kichik bo‘lgan variant tanlanishi mumkin, issiqlik almashinuvi yuzasi cheklangan tizimlarda esa yuqori \(Nu\) va \(Q\) qiymatlariga ega konfiguratsiya afzal bo‘ladi. Shu nuqtayi nazardan, “eng yaxshi geometriya” tushunchasi universal emas; u muayyan texnologik vazifa, ishchi suyuqlik, oqim tezligi, harorat diapazoni va ekspluatatsiya sharoitiga bog‘liq. Mazkur tadqiqot yondashuvining ilmiy yangiligi shundan iboratki, kanal geometriyasini baholashda faqat issiqlik uzatish emas, balki oqim taqsimoti, gidravlik qarshilik, ishlab chiqarish cheklovlari va termogidravlik samaradorlikni birlashtiruvchi tizimli mezon taklif etiladi. Amaliy jihatdan esa CFD modeli yangi issiqlik almashinuvi

qurilmasining prototipini tayyorlashdan oldin konstruktiv xatolarni aniqlash va optimal parametrlar diapazonini belgilash imkonini beradi.

Xulosa

Issiqlik almashinuvi qurilmalarining oqim kanallari geometriyasini CFD modellashtirish asosida optimallashtirish issiqlik uzatish intensivligini oshirish, gidravlik yo‘qotishlarni kamaytirish va qurilmaning umumiy energetik samaradorligini yaxshilashning samarali usuli hisoblanadi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, kanal balandligi, gidravlik diametri, qovurg‘a yoki to‘lqinsimon elementlarning burilish burchagi, amplitudasi va oralig‘i issiqlik almashinuvi hamda bosim yo‘qotilishiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Kanal geometriyasining murakkablashtirilishi odatda chegaraviy qatlamni buzadi va Nusselt sonini oshiradi, biroq ayni vaqtda oqim qarshiligini ko‘paytiradi. Shu sababli faqat issiqlik uzatish koeffitsiyentini maksimal darajaga yetkazishga asoslangan loyihalash yondashuvi energiya samaradorligi nuqtayi nazaridan maqbul emas. Eng to‘g‘ri yondashuv issiqlik uzatish, bosim yo‘qotilishi, nasos energiyasi va konstruktiv cheklovlarni birgalikda hisobga oluvchi ko‘p mezonli optimallashtirishdan iborat. CFD modellashtirishda tarmoq mustaqilligi, turbulent modelni tanlash, chegara shartlari va validatsiya masalalariga alohida e’tibor qaratish lozim. Hisoblash natijalarining ishonchliligi faqat dasturiy ta’minot imkoniyatlariga emas, balki fizik modelning to‘g‘ri tanlanishiga ham bog‘liq. Tadqiqot asosida amaliy loyihalash uchun quyidagi tavsiyalar ishlab chiqildi: birinchidan, kanalning juda tor yoki haddan tashqari murakkab geometriyasidan qochish; ikkinchidan, qovurg‘a va burilish parametrlarini Pareto-optimal yechimlar asosida tanlash; uchinchidan, kollektorlar orqali oqimning kanallar bo‘yicha bir tekis taqsimlanishini ta’minlash; to‘rtinchidan, CFD natijalarini tajribaviy ma’lumotlar yoki ishonchli empirik korrelyatsiyalar yordamida tekshirish; beshinchidan, issiqlik samaradorligi bilan bir qatorda ishlab chiqarish, tozalash, ta’mirlash va ifloslanishga chidamlilik talablarini hisobga olish. Kelgusidagi tadqiqotlarda ikki fazali oqimlar, o‘zgaruvchan issiqlik fizik xossalari, ifloslanish qatlamining hosil bo‘lishi, qo‘shimcha ishlab chiqarish texnologiyalarida tayyorlanadigan murakkab kanallar va sun’iy intellekt asosidagi tezkor optimallashtirish algoritmlarini o‘rganish maqsadga muvofiqdir. Umuman olganda, CFD asosidagi geometriya optimallashtirish metodikasi issiqlik almashinuvi qurilmalarini ilmiy asosda loyihalash, energiya sarfini kamaytirish va yuqori samarali texnologik tizimlarni yaratish uchun ishonchli nazariy hamda amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Kays W. M., London A. L. *Compact Heat Exchangers*. New York: McGraw-Hill, 1984.

2. Shah R. K., Sekulić D. P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

3. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

4. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

5. Patankar S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

6. Manglik R. M., Bergles A. E. Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset-strip-fin compact heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1995. Vol. 10, No. 2. P. 171–180.

7. Webb R. L., Kim N. H. *Principles of Enhanced Heat Transfer*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2005.

8. Wang Q. W., Zeng M., Ma T. Review of heat exchanger optimization methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019.

9. Khoshvaght-Aliabadi M., Sartipzadeh O. Geometric optimization of compact heat exchangers using thermo-hydraulic performance criteria. *Applied Thermal Engineering*. 2016.

10. Kleijnen J. P. C. Design and analysis of simulation experiments. *Springer Series in Statistics*. New York: Springer, 2008.

11. Nield D. A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. 5th ed. New York: Springer, 2017.

12. Huang X., Li H., Zhang Y. Efficient energy utilization through proper design of microchannel heat exchanger manifolds: A comprehensive review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023.

13. Fan Y., Luo L., Godefroid F. Compact heat exchangers: Design and optimization with CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019.

14. Wang L., Sundén B. Performance comparison of some tube inserts for turbulent heat transfer in a circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2002.

15. O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi. Ilmiy nashrlarga qo‘yiladigan umumiy talablar va ilmiy maqolalarni rasmiylashtirish bo‘yicha tavsiyalar. Toshkent: OAK rasmiy materiallari. – https://oak.uz/