

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

YUNUSOVA NILUFAR ABDUSAMI QIZI

**SANOAT ISSIQLIK ALMASHINISH QURILMALARI UCHUN SUV
TOZALASH QURILMASINI TAKOMILLASHTIRISH**

**02.00.16 – Kimyo texnologiyasi va oziq-ovqat ishlab chiqarish jarayonlari va apparatlari
(texnika fanlari)**

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent-2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Yunusova Nilufar Abdusami qizi

Sanoat issiqlik almashinish qurilmalari uchun suv tozalash
qurilmasini takomillashtirish.....3

Юнусова Нилуфар Абдусами кизи

Совершенствование установки водоподготовки для
промышленных теплообменных аппаратов.....21

Yunusova Nilufar Abdusami qizi

Improvement of water treatment plant for industrial
heat exchangers.....39

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....42

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

YUNUSOVA NILUFAR ABDUSAMI QIZI

**SANOAT ISSIQLIK ALMASHINISH QURILMALARI UCHUN SUV
TOZALASH QURILMASINI TAKOMILLASHTIRISH**

**02.00.16 – Kimyo texnologiyasi va oziq-ovqat ishlab chiqarish jarayonlari va apparatlari
(texnika fanlari)**

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent-2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.1.PhD/T1632 raqam bilan ro‘yhatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.tdtu.uz) hamda «Ziyonet» axborot-ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Muxitdinov Djalolitdin Paxritdinovich**
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Nurmuxamedov Xabibullo Sa’dullayevich**
texnika fanlari doktori, professor

Samandarov Doston Ishmuxammad o‘g‘li
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)

Yetakchi tashkilot: **Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi Dsc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil «__»_____soat __dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2. Tel.: (99871) 246-46-00; faks: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (__raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2. Tel.: (99871)207-14-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «__»_____kuni tarqatildi.
(2024 yil «__»_____dagi __raqamli reestr bayonnomasi).

N.R. Yusupbekov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
t.f.d., professor, O‘zR FA akademigi

U.F. Mamirov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi,
t.f.d., professor

Sh.M. Gulyamov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda sanoat korxonalaridagi aylanma suv ta'minoti tizimida ishlatiladigan suvni yumshatish va tuzsizlantirish bilan bog'liq bo'lgan ilmiy ishlanmalarga katta e'tibor qaratilmoqda. Aylanma suv ta'minoti tizimida qattiqligi yuqori bo'lgan suvning bug'lanishi va uni doimiy ravishda to'ldirish quvurlar va uskunalardan olib tashlash qiyin bo'lgan qattiq karbonatli qatlamlarning shakllanishiga alohida e'tibor berishni taqozo etadi. Bunday qatlamlar yuqori mexanik xususiyatlarga va yetarlicha past issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, bu esa issiqlik energiyasi ortiqcha sarfining va issiqlik texnikasi qurilmalarini qayta ta'mirlash ishlariga sarflanadigan xarajatlarning kamaytirilishi muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Jahonda hozirgi kunda texnologik issiqlik almashinuv uskunalarining samarasiz ishlashi natijasida kelib chiqadigan yoqilg'i va energiyaning asossiz ortiqcha sarflanishi muammosi bilan bog'liq turli sohalarda issiqlik almashinuvining samarali usullari va texnologiyalarini ishlab chiqish, samaradorligi yuqori bo'lgan materiallardan foydalanish, zamonaviy kompyuter modellashtirish usullaridan foydalanishga qaratilgan ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Shu munosabat bilan energiyani asossiz ortiqcha iste'mol qilish ishlab chiqarish va iste'mol xarajatlarining oshishiga olib kelayotganligi sababli korxonalar va umuman davlat byudjetlariga salbiy ta'sir qilishi natijasida sanoatning turli sohalarida, jumladan, energetika, kimyo va boshqalarda duch keladigan muhim va dolzarb muammodir.

Respublikamizda sanoat korxonalaridagi aylanma suv ta'minoti tizimida issiqlik almashinuv jarayoniga to'sqinlik qiladigan va issiqlik almashinuv uskunalarining muddatidan oldin ishdan chiqishiga olib keladigan cho'kindi qatlamlarning hosil bo'lishi bilan bevosita bog'liq bo'lgan issiqlik texnikasi qurilmalarining xizmat ko'rsatish muddatini uzaytirishga alohida e'tibor qaratilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning Taraqqiyot strategiyasida, jumladan, "Sanoat tarmoqlarida yo'qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish ..., zamonaviy energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etish, ... energiya samaradorligini oshirish bo'yicha loyihalarni moliyalashtirish"¹ vazifalari belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni amalga oshirish, jumladan, issiqlik almashinuvi uskunalarining samaradorligini oshirish uchun suvni yumshatish va tuzsizlantirish qurilmasini yaratish, samaradorligini oshirish va amaliyotga joriy etish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018-yil 27-apreldagi PF-3682-sonli «Innovatsion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliyotga tatbiq etish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi, 2019-yil 3-apreldagi PF-4265-sonli «Kimyo sanoatini yanada isloh qilish va investitsion jozibadorlikni oshirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi farmonlarida, 2017-yil 7-fevraldagi PQ-4947-sonli «O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida»gi va 2022-yil 28-yanvardagi PQ-60-sonli «Yangi O'zbekistonning 2022-2026 yillarga mo'ljallangan rivojlanish strategiyasi to'g'risida»gi qarorida hamda ushbu sohadagi boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda nazarda tutilgan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. «Energetika, energiya va resurslarni tejash» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq amalga oshirildi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Issiqlik almashinuv qurilmalarining ichki yuzasida cho'kindi qatlamlar hosil bo'lishining oldini olish maqsadida suvni yumshatish texnologiyasini yangilash va takomillashtirish bilan bog'liq bo'lgan masalalarni hal qilishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar dunyoning ta'lim va ilmiy tadqiqot muassasalarida, shu jumladan Stanford University (AQSH), Cranfield University (Buyuk Britaniya), Nanyang Technological University (Singapur), Delft university of technology (Niderlandiya), Engineering Institute of technology (Avstraliya), N.E.Bauman nomidagi Moskva Davlat texnika universiteti (Rossiya), Toshkent davlat texnika universiteti va Toshkent kimyo-texnologiya institutida (O'zbekiston) olib borilmoqda.

Ta'kidlash joizki, butun dunyo olimlari issiqlik muhandislik tizimlarida ishlatiladigan suvni yumshatish jarayonlarining samarali texnologiyalari va apparat dizaynini ishlab chiqish bo'yicha ko'plab ilmiy tadqiqotlar o'tkazdilar. Suvni yumshatish muammosi bilan quyidagi xorijiy olimlar shug'ullanishgan: Obertas I.A.², Mixaylov V.G.³, Apell J.N.⁴, Boyer T.H.⁴, Zhao G.⁵, Wu X.⁵, Tan X.⁵, Wang X.⁵ va boshqalar. Mamlakatimiz olimlaridan Muxiddinov D.N.⁶, Yusupbekov N.R.⁷, Muxitdinov D.P.⁷, Turabdjano'v S.M.⁸, Raximova L.S.⁸, Yusupaliyev R.M.⁹lar isitish tizimlarida va boshqa texnologik qurilmalarda cho'kindi qatlamlar hosil bo'lishining asosiy manbai bo'lgan suvning qattiqligini kamaytirishning turli usullarini qo'llashga asoslangan ilmiy tadqiqotlar natijalarini ishlab chiqarishga joriy etdilar.

Biroq, erishilgan muhim yutuqlarga qaramay, ion almashinuviga asoslangan suvni yumshatish, ya'ni kalsiy va magniy ionlari natriy ionlari bilan almashganda

² Obertas I.A.: Modeling of water softening processes on cation exchangers. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine 10/2007, 134–138.

³ Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования: производственно-практическое издание. М.: ДеЛи принт, 2004. 152 с.

⁴ Apell J.N., Boyer T.H.: Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness. Water Res. 44, 2010, 2419–2430.

⁵ Zhao G., Wu X., Tan X., Wang X. Sorption of heavy metal ion from aqueous solutions: A review. Open Colloid Sci. J. 2011. N 4. P. 19-31.

⁶ Mukhitdinov D.N. New methods for obtaining quality drinking water in a water treatment plant // Chemical Technology, Control and Management, vol. 2020, issue 3, Art. 2, -PP: 10-14.

⁷ Yusupbekov N.R., Muxitdinov D.P. Texnologik jarayonlarni modellashtirish va optimallashtirish asoslari. – Toshkent: “Sano-standart”, 2019. 480 bet

⁸ Turabjanov S.M., Rakhimova L.S. Synthesis of phosphoric acid cationexchange polymer of polycondensation type // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. №1-2, -PP: 111-113.

⁹ Yusupaliyev R.M. Issiqlik elektr stansiyalarida suv tayyorlash texnologiyasi va kimyoviy nazorat. – Toshkent: “Sano-standart”, 2013. 288 bet.

suvning qattiqligi pasayishi va cho‘kindi qatlamlar hosil bo‘lishining oldini oladigan qurilmalar va texnologiyalarni ishlab chiqish yetarli darajada o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining OT-F7-88-«Istiqbolli energiya va resurslarni tejaydigan issiqlik va massa uzatish jarayonlarining amaliy asoslarini takomillashtirish» (2017-2020 yy.) mavzusidagi loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi sanoat korxonalarining aylanma suv ta’minoti tizimida issiqlik almashinuv jarayonida ishlatiladigan suvni yumshatish jarayonini matematik modellashtirish va qurilmani takomillashtirish.

Tadqiqotning vazifalari:

aylanma suv ta’minoti tizimining hozirgi holatini va ularda olib borilayotgan suvni yumshatish va tuzsizlantirish jarayonlarini tahlil qilish;

aylanma suv ta’minotida issiqlik va massa uzatish jarayonlarining samaradorligini oshirish bo‘yicha tajribalar o‘tkazish uchun tajriba qurilmasini loyihalash va ishlab chiqish;

ion almashinuvining kinetik va muvozanat shakllarini hisobga olgan holda ikki qismli natriy-kationit filtrida suvni yumshatish bosqichining matematik modelini ishlab chiqish;

suvni yumshatish va tuzsizlantirishning asosiy texnologik xususiyatlarini hisoblash metodologiyasini ishlab chiqish;

suvni yumshatish va tuzsizlantirish issiqlik energiyasining sarfini, to‘xtab turish vaqtini va texnik xarajatlarni kamaytirishga ta’sirini o‘rganish.

Tadqiqotning obyekti sifatida suvni tuzsizlantirish va yumshatish qurilmasi olingan.

Tadqiqotning predmeti suv oqimining bir xil taqsimlanishini ta'minlash va ion almashinadigan smoladan eng samarali foydalanish uchun qurilma elementlarini loyihalash va joylashtirishdir.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot maqsadini amalga oshirish uchun suvni yumshatish jarayonining fizik-matematik modeli, matematik modellashtirish va algoritmlash usullari, gidrodinamik va issiqlik almashinish jarayonlarini o‘rganishning hisobiy va tajribaviy usullari, shuningdek olingan natijalarni matematik qayta ishlash usullari qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ikki qismli natriy-kationit filtridagi suvni yumshatish jarayonidagi ion almashinuvining kinetik va muvozanat qonuniyatlarini hamda ionit qatlami orqali suyuqlik harakatining gidrodinamik xususiyatlarini hisobga olish imkonini beradigan matematik model ishlab chiqilgan;

ion almashinuvi, adsorbsiya, diffuziya va filtrlash jarayonlarini tavsiflovchi kimyo, fizika va gidrodinamika qonunlariga asoslanib, suvni yumshatish moslamasida “regeneratsiya” jarayonini hisoblash imkonini beruvchi model ishlab chiqilgan;

cheklangan elementlar usuli - tizimni diskret elementlarga ajratuvchi, bir jinsli va murakkab geometrik shakllarni modellashtirish imkonini beruvchi PDE Toolbox-ga asoslanib, matematik tavsiflash uchun suvni yumshatish moslamasida to'liq "sorbsiya-regeneratsiya" sikli tenglamalar tizimini yechishni ta'minlaydigan algoritim ishlab chiqilgan;

suvni yumshatishda vaqt bo'yicha Ca va Mg tuzlari konsentratsiyasining o'zgarish dinamikasini hamda regeneratsiya jarayonining vaqtini aniqlash imkonini beradigan qurilmaning konstruksiyasi loyihalashtirilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

suvni yumshatish qurilmasi ishlab chiqilgan va tayyorlangan, undan foydalanishning maqsadga muvofiqligi va istiqbollari tavsiflangan;

ikki qismlı natriy-kationit filtrida suvni yumshatish va ionitni qayta tiklash bosqichlari modelining tenglamalari sistemasini ikki usul bilan yechish uchun algoritmlar ishlab chiqilgan;

cho'kindi qatlamlarning hosil bo'lish jarayoni va tarkibi tabiiy suvning kimyoviy tarkibi bilan o'zaro bog'liqligi tajriba asosida o'rganilgan;

issiqlik qurilmalari devorlaridagi qatlamlarning mineral tarkibi aniqlangan va suvni yumshatishning ion almashinuv usuliga asoslangan qatlamlar hosil bo'lishining oldini olish usuli taklif qilingan;

issiqlik almashinuv qurilmalarida cho'kindi qatlamlarning hosil bo'lish tezligi suvning qattiqligi, harorati, suvning pH qiymati, karbonat anhidrid miqdori, bosim va oqim turbulentsligiga bog'liqligi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi ilmiy usullarning umume'tirof etilgan tamoyillariga muvofiqligi, matematik modellashtirishning nazariy jihatdan ishonchli usullaridan foydalanilganligi, tahlil usullarini tanlashning to'g'riligi, olingan natijalarning mantiqiy ketma-ketligi va nazariy va eksperimental tadqiqot natijalari izchilligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati ikki qismlı natriy kationit filtrida suvni yumshatish bosqichining matematik modeli ishlab chiqilganligi, ion almashinuvining kinetik va muvozanat qonuniyatlarini shuningdek, suyuqlikning ionit qatlami orqali kirib borishining gidrodinamik xususiyatlarini hisobga olgan holda ion almashinuv jarayonining matematik modeli ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ikki qismlı ion almashinuv filtri suvni sifatli yumshatishda, aylanma suv ta'minoti tizimidagi uskunalarning samaradorligi va ishonchliligini oshirish imkonini beruvchi ishlab chiqilgan suvni yumshatish qurilmasi va undan foydalanishning maqsadga muvofiqligi va istiqbollarini tavsiflanishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Sanoat korxonalarining aylanma suv ta'minoti tizimida issiqlik almashinuv jarayonida ishlatiladigan suvni yumshatish qurilmasini takomillashtirish bo'yicha olingan natijalar asosida:

suvni yumshatish qurilmasida "sorbsiya-regeneratsiya" to'liq siklini matematik tavsiflash uchun tenglamalar tizimini yechishni ta'minlovchi algoritim Navoiy shahri "Elektrkimyozavod" QK AJda joriy qilingan (O'zbekiston

Respublikasi “Elektrkimyozavod” QK AJning 2024 yil 5 yanvardagi №014-son ma’lumotnomasi). Natijada, noxiziqli differensial tenglamalar tizimini yechish va natijalarni baholashning aniqligini oshirish orqali issiqlik almashinuv qurilmalarida cho’kindi qatlamlarning hosil bo’lish tezligi va suvning sifat ko’rsatkichlarini aniqlash imkonini bergan.

suvni yumshatish moslamasida “regeneratsiya” jarayonini hisoblash imkonini beruvchi model, suvni yumshatish uchun ko’p funksiyali qurilma Navoiy “Elektrkimyozavod” QK AJda suvni yumshatish uchun ikki kamerali ion almashinuv filtrining sinov qurilmasiga joriy qilindi (O’zbekiston Respublikasi “Elektrkimyozavod” QK AJning 2024-yil 5-yanvardagi 014-son ma’lumotnomasi). Natijada, regeneratsiya eritmasi va suv hajmining sarfini kamaytirish, suvni sifatli yumshatish, aylanma suv ta’minoti tizimidagi uskunalarining samaradorligi va ishonchligini oshirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 2 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilindi.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo’yicha jami 12 ta ilmiy ishlar e’lon qilingan. Shulardan 6 ta ilmiy maqola O’zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi ro’yxatidagi ilmiy jurnallarda nashr etilgan hamda O’zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligi tomonidan EHM uchun dasturiy mahsulotni rasman ro’yxatdan o’tkazganligi to’g’risida guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, uch bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 118 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, maqsad va vazifalar tavsiflangan, tadqiqot obyekti va predmeti aniqlangan, tadqiqotning O’zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo’nalishlariga mosligi ko’rsatilgan, ilmiy yangiligi aniqlangan va tadqiqotning amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchligi tasdiqlangan, nashr etilgan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi bo’yicha tadqiqot natijalarining bajarilishi to’g’risida ma’lumot berilgan.

Dissertatsiyaning «**Ionit qatlamli qurilmalarda suvni yumshatish muammolarining hozirgi holatini tahlil qilish**» deb nomlangan **birinchi** bobida, murakkab texnologik jarayonni ifodalovchi sanoat korxonalarida aylanma suv ta’minoti uchun suvni tozalashning mavjud usullari bo’yicha ilmiy adabiyotlarning tahlili keltirilgan, aylanma suv ta’minoti uchun suvni tozalashning ion almashinuv usulining tanlanishi asoslangan, bunday qurilmalarni modellashtirish usullari ko’rib chiqilgan. Analitik tahlil asosida suv yumshatish qurilmasini ion almashinuvi usuli bilan takomillashtirish va ion almashinuvining kinetik va muvozanat qonuniyatlarini hisobga olgan holda yumshatish jarayonining matematik modelini ishlab chiqishdan

iborat bo'lgan dissertatsiya tadqiqotining aniq maqsadi shakllantirilgan va tadqiqot vazifalari belgilab olingan.

Dissertatsiyaning «**Ikki qismli apparatda ion almashinuvi jarayonining matematik modeli**» deb nomlangan **ikkinchi** bobida ikki qismli natriy-kationit filtrida suvni yumshatish bosqichining matematik modeli ishlab chiqilgan va uni hal qilish algoritmi ishlab chiqilgan. Qabul qilingan taxminlarni hisobga olgan holda ion almashinish jarayonining matematik tavsifi moddiy muvozanatni, sferik shakldagi zarrachaga diffuziya kinetikasini, chiziqli bo'lmagan izotermni va moddaning qattiq fazadagi lokal konsentratsiyasining uning o'rtacha qiymati bilan o'zaro bog'liqligini aks ettiruvchi tenglamalarni o'z ichiga oladi. (1)- (4):

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_{cp}}{\partial \tau} + v \varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = \bar{D}_{\phi} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\bar{C}_p = f(C), \quad (3)$$

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr \quad (4)$$

Yuqorida keltirilgan tenglamalardan tashqari matematik tavsif boshlang'ich va chegaraviy shartlarni o'z ichiga oladi:

$$C(\tau, x)|_{x=0} = C_0, \quad (5)$$

$$C(\tau, x)|_{x=H} = C_{BX}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (7)$$

$$C(\tau, r)|_{r=0} = \bar{C}_0(r), \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{\beta}{\bar{D}_{\phi}} (C - C_{cp}), \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (10)$$

Biz modelni yechishni boshlang'ich va chegaraviy shartlarni ((5)-(7) tenglamalar) hisobga olgan holda xususiy hosiladagi (1) bir xil bo'lmagan differensial tenglamani yechishdan boshlaymiz:

$$\varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau, x) + (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} C_{sp}(\tau, x) + v \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(\tau, x) = D_p \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau, x), \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} C(0, x) = C_0 \\ C(\tau, 0) = C_{v,x} \end{array} \right\} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau, H) = 0$$

Furye usulidan foydalanib, biz ushbu muammoning yechimini quyidagi shaklda qidiramiz:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} C_n(\tau) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \quad (12)$$

Funksiya o'zgaruvchi x ga nisbatan Furrye qatoriga bo'linadi deb faraz qilsak, (12) formulani (11) tenglamaga almashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\varepsilon \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{d}{d\tau} C_n(\tau) \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \right) + (1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial}{\partial \tau} C_{sp}(\tau, x) \right) + \nu \varepsilon \left(\frac{\partial}{\partial x} C(\tau, x) \right) = Dp \varepsilon \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau, x) \right)$$

Bu tenglamadan kelib chiqadiki:

$$\frac{d}{d\tau} C_n(\tau) + \frac{Def C_n(\tau) \pi^2 n^2}{H^2} = 0 \quad (13)$$

Quyidagi qiymatni aniqlaymiz: $C_n(\tau) = Cle^{-\frac{Def \pi^2 n^2 \tau}{H^2}}$

$\tau = 0$ bo'lganda $C_n(\tau)$ uchun dastlabki shartlarga asoslanib (5)-(6)-(7) $C_n(\tau) = 0$ uchun dastlabki shartlar olinadi. Bu yerdan (13) tenglamaning boshlang'ich shartlarini qoniqtiradigan tenglamani olishimiz mumkin:

$$C_n(\tau) := \int_0^{\tau} te^{-\frac{Def \pi^2 n^2 (t-1)}{H^2}} dt$$

Olingan natijani (12) formulaga almashtirib, (11) tenglamaning boshlang'ich va chegaraviy shartlarining yechimlarini quyidagi shaklda aniqlaymiz:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_0^{\tau} te^{-\frac{Def \pi^2 n^2 (t-1)}{H^2}} dt \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \quad (14)$$

Agar bir vaqtning o'zida boshlang'ich shartlar nolga teng bo'lmasa, u holda (14) tenglamani yechishda bir jinsli tenglamaning $S(\tau)|_{x=0} = \varphi(x)$ boshlang'ich va chegaraviy shartlarining yechimini qoniqtiradigan shartlarni qo'shish kerak.

Olingan natijani quyidagi Grin funksiyasi sifatida ko'rish mumkin bo'ladi:

$$C(\tau, x) := \int_0^t \int_0^H G(x, \xi, t, \tau) d\xi d\tau$$

U holda (14) tenglama quyidagi shakldagi funksiyaga o'zgaradi:

$$G(x, \xi, \tau, t) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2e^{-\frac{Def \pi^2 n^2 (\tau-1)}{H^2}} \sin\left(\frac{\pi n \xi}{H}\right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{H}$$

Shunday qilib, boshlang'ich va chegaraviy shartlarni hisobga olgan holda (11) tenglamaning yechimi quyidagi shaklga ega bo'ladi:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) e^{-\frac{Def \pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def \pi^3 n^3} - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) e^{-\frac{Def \pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def \pi^3 n^3} \right) - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{Def \pi^3 n^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{Def \pi^3 n^3} \right)$$

Boshlang'ich va chegaraviy shartlarni hisobga olgan holda (2) kinetik bir xil bo'lmagan differensial diffuziya tenglamasining yechimini ko'rib chiqamiz (8)-(10):

$$\frac{\partial}{\partial \tau} Ct(\tau, r) = Def \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} Ct(\tau, r) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, r) \right),$$

$$Ct(0, r) = Ct[0](r),$$

$$\frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, r0) = \frac{\beta}{Def} (C - Cgr)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, 0) = 0.$$

Furye usulidan foydalanib, ushbu masalaning yechimini quyidagi ifoda orqali ifodalash mumkin:

$$G(r, ri, \tau, t) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2e^{\frac{Def\pi^2 n^2 (\tau-1)}{H^2}} \sin\left(\frac{\pi r r_i}{H}\right)}{H}$$

Bunday holda, boshlang'ich va chegaraviy shartlarni hisobga olgan holda (2) tenglamaning yechimi (8)-(10) sifatida ifodalanishi mumkin:

$$Ct(\tau, r) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu \sin\left(\frac{1}{7}r\right) \pi H^2 (2r + (-1)^{n+1}r - H + H(-1)^n) \left(e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}} - 1\right) e^{-a\tau} \sin\left(\frac{\pi nr}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3}$$

Tenglamaning ikkinchi komponenti (1) interfaza uzatilishiga qarab oqim miqdorini aniqlaydi. Kinetik tenglamani boshlang'ich va chegaraviy shartlarini hisobga olgan holda yechish va natijani (4) tenglama yordamida birlashtirish bizga oqim miqdorini aniqlashga imkon beradi. Maqsadli komponent konsentratsiyasining notekis taqsimlanishi sharti bilan sferik jismlarning issiqlik o'tkazuvchanligini aniqlash muammosining o'xshashligi hal qilinayotgan masala bilan bizga quyidagi shaklda yechim olish imkonini beradi:

$$C(\tau) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\frac{1}{n^3} (25801.22755e^{-0.25000000000\tau} \sin(0.1428571429r)\tau(-1.r + r \cos(3.141592654n)) + 100. - 100. \cos(3.141592654n)) (e^{0.00002467401100n^2\tau} - 1.) \sin(0.01570796327nr))}{n^3}$$

Shunday qilib, suvni yumshatishda ion almashinuv jarayonini taxminan tavsiflovchi tenglamalar sistemasining yechimi quyidagi sistemaga aylanadi:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{C}_{i,j} = mC_{i,j} + u \\ C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi mx}{H}\right) e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi mx}{H}\right) e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} \right) - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi mx}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi mx}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} \right) \\ Ct(\tau, r) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu \sin\left(\frac{1}{7}r\right) \pi H^2 (2r + (-1)^{n+1}r - H + H(-1)^n) \left(e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}} - 1\right) e^{-a\tau} \sin\left(\frac{\pi nr}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} \\ C(\tau) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\frac{1}{n^3} (25801.22755e^{-0.25000000000\tau} \sin(0.1428571429r)\tau(-1.r + r \cos(3.141592654n)) + 100. - 100. \cos(3.141592654n)) (e^{0.00002467401100n^2\tau} - 1.) \sin(0.01570796327nr))}{n^3} \end{array} \right.$$

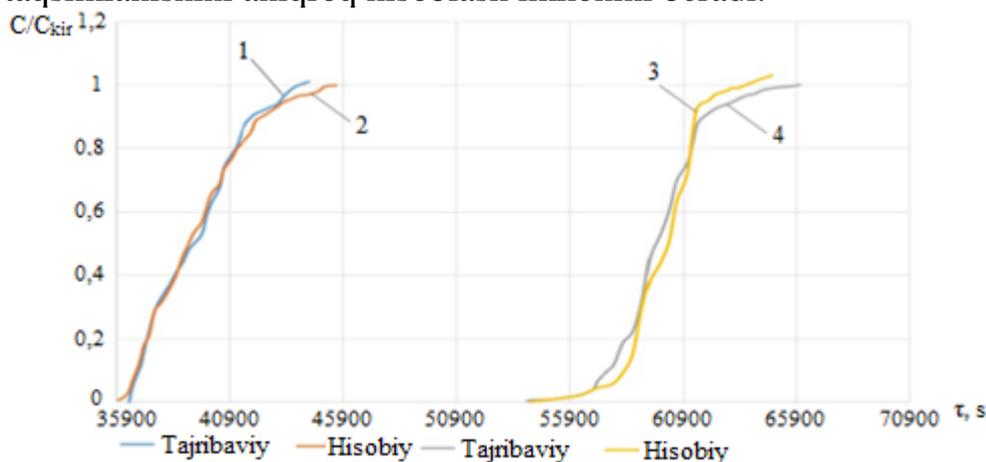
Ushbu sistemani yechish uchun cheklangan elementlar usuli – PDE Toolboxdan foydalanildi.

Modelni yechish uchun qurilgan algoritm asosida KU-2-8(Na) kationitda CaCl₂ ionlarining sorbsiyasi bo'yicha hisob-kitoblar amalga oshirildi. 1-rasmda

eksperimental va hisoblangan ma'lumotlarni taqqoslash bo'yicha natijalar ko'rsatilgan.

Eksperiment orqali aniqlangan nuqtalarning natijalarini va hisoblash usuli bilan olingan egri chiziqni taqqoslash shuni ko'rsatadiki, hisoblangan ma'lumotlar eksperimental ma'lumotlarni qoniqarli tarzda tasdiqlaydi.

Shunday qilib, mikroq'ovak tuzilishga ega zarrachalar bilan bir jinsli muhitda ionlarning konvektiv diffuziya va adsorbsion massa uzatish jarayonini tavsiflovchi matematik model ishlab chiqilgan bo'lib, bu komponentlar konsentratsiyasining taqsimlanishini aniqroq hisoblash imkonini beradi.



1-rasm. Ca²⁺ sorbsiyasining egri chiziqlari eksperimental va hisoblangan qiymatlarini taqqoslash

1,2 – C_{kir}=0,2n da hisobiy va tajribaviy qiymatlar;

3,4 - C_{kir}=0,09n da hisobiy va tajribaviy qiymatlar;

So'ng sorbentni qayta tiklash jarayonining matematik tavsifi quyidagi taxminlar asosida tuzildi:

ion almashinuvi jarayonining tezligi tashqi va ichki diffuziya bilan cheklandi; suyuq fazaning apparatdagi bir o'lchovli oqimi faqat x koordinatasiga bog'liq; eritma konsentratsiyasining o'zgarishi suyuq fazaning o'rtacha harakat tezligining funksiyasidir, faqat ionit va eritma orasidagi bo'ylama aralashtirish va massa uzatish jarayoni, uning muvozanati chiziqli Genri izoterma tenglamasi bilan tavsiflanadi;

Yuqoridagi taxminlarni hisobga olgan holda sorbentni qayta tiklash jarayonining matematik tavsifi quyidagicha:

moddiy balans tenglamasi:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_p}{\partial \tau} + v \varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

sferik zarrachadagi diffuziya kinetikasini aks ettiruvchi tenglama:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = \bar{D}_{\phi} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right),$$

chiziqli bo'lmagan Genri izotermasining tenglamalari:

$$\bar{C}_p = \Gamma C,$$

qattiq fazadagi moddaning lokal konsentratsiyasining uning o‘rtacha qiymati bilan bog‘liqligini aks ettiruvchi tenglama:

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr$$

Matematik tavsif boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni o‘z ichiga oladi:

$$C(\tau, x)|_{\tau=0} = C_0, \quad C(\tau, x)|_{x=0} = C_{BX}$$

$$\left. \frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad C(\tau, r)|_{\tau=0} = \bar{C}_0(r)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{\beta}{D_{\phi}} (C - C_{cp}), \quad \left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$$

Ushbu matematik tavsifni yechish uchun, sorbsiya jarayonida bo‘lgani kabi, qurilmaning butun balandligi bo‘ylab ionit qatlami har birining balandligi $h = H/\eta$ bo‘lgan elementar qatlamlarga bo‘linadi.

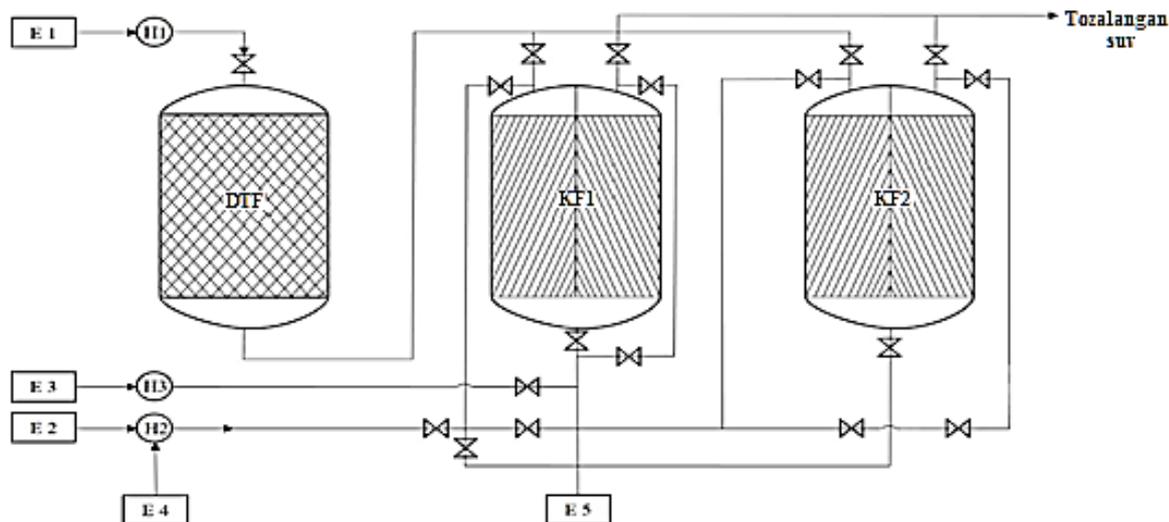
Texnologik jarayonning vaqti ketma-ket bog‘langan vaqt oralig‘iga o‘xshaydi. Tegishli o‘zgarishlardan so‘ng, ushbu modelni hal qilish uchun cheklangan elementlar usuli – PDE Toolbox ishlatilgan. 1-jadvalda yuqoridagi modelga muvofiq hisoblangan qiymatlar va kationit regeneratsiyasi bo‘yicha eksperimental ma‘lumotlar ko‘rsatilgan. Tajribaviy qiymatlarning hisoblangan qiymatlardan o‘rtacha kvadratik og‘ishi 16% dan oshmaydi.

1-jadval

Ishlab chiqilgan kationit regeneratsiyasi qiymatlari modelga muvofiq hisoblangan va eksperimental ma‘lumotlar

Na ⁺ - Ca ²⁺ almashinuvi			Na ⁺ - Mg ²⁺ almashinuvi		
Vaqt τ , s	C/C _{kir}		Vaqt τ , s	C/C _{kir}	
	eksperiment	hisoblangan		eksperiment	hisoblangan
1	2	3	4	5	6
240	0,680	0,678	180	0,698	0,721
300	0,633	0,629	240	0,679	0,701
360	0,574	0,567	300	0,644	0,679
...
660	0,271	0,268	600	0,467	0,488
720	0,198	0,189	660	0,413	0,449
780	0,143	0,147	720	0,387	0,407
...
1020	0,084	0,098	960	0,238	0,252
1080	0,081	0,089	1020	0,211	0,233
1140	0,078	0,081	1080	0,192	0,200
1320	-	0,007	1260	0,075	0,081
-	-	-	1320	0,009	0,012

Bobning so'ngida sxemasi 2-rasmda ko'rsatilgan suvni yumshatish qurilmasida "sorbsiya-regeneratsiya" to'liq siklini modellashtirish va hisoblash keltirilgan.



2-rasm. Suvni yumshatishning to'liq sikli sxemasi
DTF – dastlabki tozalash filtri; KF₁-KF₂ –ikki kamerali filtr

Ionit qatlamli suvni yumshatish qurilmasida "sorbsiya-regeneratsiya" to'liq siklining matematik tavsifi quyidagi tenglamalardan iborat:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_{cp}}{\partial \tau} + v\varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} = D_{\pi} \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \bar{D}_{ef} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right), \quad (16)$$

$$\bar{C}_p = f(C), \quad (17)$$

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr, \quad (18)$$

shunga ko'ra, moddiy muvozanat, diffuziya kinetikasi, chiziqli bo'lmagan izoterma va lokal konsentratsiya $\bar{C}(\tau, r)$ ning o'rtacha komponenti $\bar{C}_{cp}(\tau)$ bilan bog'liqligini aks ettiruvchi birikma tenglamasi. Shuningdek, sistema boshlang'ich va chegara shartlarini ham o'z ichiga oladi:

$$C(\tau, x) \Big|_{\tau=0} = C_0(x), \quad (19)$$

$$C(\tau, x) \Big|_{x=0} = C_{BX}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = 0, \quad (21)$$

$$\bar{C}(\tau, r) \Big|_{\tau=0} = \bar{C}_0(r), \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{\beta}{D_{ef}} (S - S_{gr}), \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (24)$$

(15) – (24) tenglamalar sistemasini ishlab chiqilgan metodikaga muvofiq yechamiz. Buning uchun biz Nikolskiy izotermasining nohiziq tenglamasidan foydalanamiz:

$$\bar{S} = a_0 \frac{kS}{1 + kS}.$$

Ionit qatlamining balandligi H uzatish birliklari soni m_L bilan belgilanadi, chunki uzatish birliklari qancha ko‘p bo‘lsa, ionlarni suvdan o‘tkazish uchun shuncha ko‘p ionit qatlami kerak bo‘ladi. Uzatish birliklari soni qancha ko‘p bo‘lsa, kiruvchi ionlardan xalos bo‘lish jarayoni shunchalik samarali bo‘ladi. Uzatish birliklari soni suyuq fazada uzatish birligi balandligining o‘zgarishini ko‘rsatadi. Keyinchalik, biz ionit qatlamini balandligi bo‘yicha har birining balandligi $h = H/\eta$ bo‘lgan elementar qatlamlarga ajratamiz. Texnologik jarayonning vaqti ketma-ket bog‘langan vaqt oralig‘i shaklida ifodalanadi va eritmaning konsentratsiyasi C_{ij} shaklida qayd etiladi, bu yerda indeks i ionit qatlamining sonini, j esa vaqt oralig‘ini ko‘rsatadi. Biz funksiyani $\bar{C}_0(x)$ funksiyalari bo‘yicha η bilan almashtirish imkoniyatini tan olamiz. Funksiyalarni almashtirish bajarilgan boshlang‘ich shartni (19) tenglama bilan almashtirish imkonini beradi.

$$C(\tau, x) \Big|_{\tau=0} = C_{0,i} = \text{const},$$

va diffuziya tenglamasi uchun (22) tenglama bu tenglamada:

$$\bar{C}(\tau, r) \Big|_{\tau=0} = \bar{C}_{0,i}(r).$$

Kiritilgan o‘zgartirishlar ion almashinuvi jarayonining muvozanatsiz dinamikasini hisoblash yechimini adsorbsion qurilmadagi maqsadli komponent konsentratsiyasining ikkala fazada ham notekis taqsimlanishi konsentratsiyani bir xil boshlang‘ich taqsimot bilan adsorbsion qurilmadagi eritma konsentratsiyasining fazo-vaqt bo‘yicha taqsimlanishini hisoblash yechimi haqida ma’lumot olish imkonini beradi.

Tegishli almashtirishlar va o‘zgartirishlardan so‘ng, biz belgilangan balandlikning i -ionit qatlami va j -vaqt oralig‘i uchun $C^C(x, \tau)$ funksiyasini hisoblash formulasini olamiz:

$$\frac{C^S(\tau, X)}{S_{VX}} = 1 - \frac{e^{-\frac{V^2}{2Dp}(\frac{\tau}{2} - \frac{X}{V})}}{S_{VX}} \left\{ \bar{K}_j \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_k \frac{X}{h}) e^{\frac{v^2}{4Dp}\tau}}{d_k R_k^2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_k \frac{X}{h}) e^{-\frac{Dp}{h^2} \lambda_k^2 \tau} \left[\left(\frac{S_{VX} - S_0}{S_{VX}} \right) \lambda_k^2 R_k - \bar{K}_j \lambda_k^3 \right]}{d_k R_k^2} \right\}.$$

Olingan yechimlar integratsiyasi sorbent qatlami bo‘lgan qurilmada komponentlar konsentratsiyasining tarqalish dinamikasi haqida tasavvur beradi.

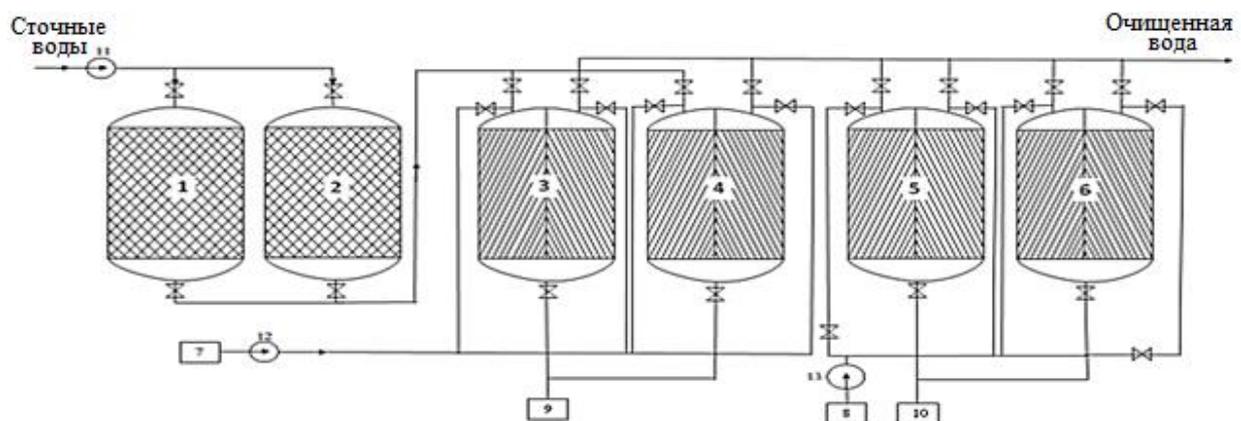
Dissertatsiyaning «**Issiqlik qurilmalari devorlaridagi qatlamlarning mineral tarkibini eksperimental tarzda aniqlash va suvni yumshatishning ion almashinuvi usuli bilan qatlamlarning oldini olish**» deb nomlangan uchinchi

bobida, Respublikaning Toshkent, Qashqadaryo va Navoiy viloyatlari korxonalarining qozon qurilmalari va quvurlarining ichki yuzalaridagi choʻkindi qatlamlar tarkibi oʻrganildi. Shu maqsadda metall quvurlar va issiqlik almashinuv qurilmalari ochilgandan keyin ularning ichki yuzasidan namunalar olindi. Namuna olish uni olish joyi, quvur yoki issiqlik almashinuv qurilmasining materiali, issiqlik texnikasi uskunasi ishlashining texnologik parametrlari (uskunaning taʼmirlash muddati, harorat rejimi, maksimal va minimal harorat qiymatlari, quvurlar va issiqlik almashinuvchilardagi bosim, shuningdek, qurilmalarning texnologik parametrlari) bilan birga olib borildi. Sanoat korxonasi tomonidan ishlatiladigan suvning tarkibi yumshatishdan oldin va keyin oʻrganildi.

Texnologik jarayonlarda hosil boʻlgan qatlamlarda turli xil kimyoviy birikmalar va minerallarning tarqalishini, kimyoviy tarkibi, kristall tuzilishi va qatlamlarning morfologiyasini aniqlash uchun rentgen diffraktometriyasi (XRD) usullari qoʻllanildi. Rentgen diffraktometriyasi (XRD) - qatlamlarda turli minerallarning tarqalishini oʻlchash uchun rentgen nurlaridan foydalanadigan usul hisoblanadi. Qatlamlar namunasi detektorga joylashtiriladi va rentgen nurlari namunadan oʻtib, minerallarning tarkibini aniqlash uchun tahlil qilinishi mumkin boʻlgan difraksiya tasvirini yaratadi.

Fazalarning miqdoriy tarkibi Crystallographica Search-Match amaliy dasturiy taʼminot toʻplami yordamida aniqlandi.

Turli korxonalardan olingan suv namunalarining tarkibi standart usullar asosida aniqlandi. Soʻng issiqlik almashinuvchilari va aylanma suv quvurlari yuzalaridagi choʻkindi qatlamlarning kimyoviy tarkibi aniqlandi. Issiqlik almashinuvchilar va aylanma suv quvurlari yuzalaridagi choʻkindi qatlamlar odatda suvdagi turli xil mineral tuzlardan iborat boʻladi. Choʻkindi qatlamning tarkibi tizimning joylashuvi va ishlash holatiga qarab farq qilishi mumkin. Masalan, agar suvda yuqori konsentratsiyali kalsiy va magniy boʻlsa, unda choʻkindi qatlamlarda karbonat, sulfat va xlorid kabi elementlarning birikmalari boʻlishi mumkin. Agar suvda yuqori konsentratsiyali temir va marganets boʻlsa, unda choʻkindi qatlamlarda oksid, gidroksid va karbonat kabi elementlarning birikmalari boʻlishi mumkin.



3-rasm. Ikki kamerali suvni tuzsizlantirish qurilmasining texnologik sxemasi
1,2 – tindirgich filtrlari; 3,4 va 5,6 –H-kationit va OH-anionit filtrlari; 7,8 i
9,10 – regeneratsiya va chiqindi eritmalar uchun baklar;
11-13 - nasoslar

Qatlamlar hosil bo'lishining oldini olish uchun ion almashinuv usuli bilan suvni yumshatish uchun tajriba asosida tadqiqotlar o'tkazildi.

Tavsiya etilayotgan ion almashinuvi filtrida suvni tozalash ikki bosqichdan iborat bo'lgan, uyg'unlashgan sxema bo'yicha amalga oshiriladi. Tozalangan suv nasos (11) orqali ichiga kvarts qumi solingan tindirish filtriga (1) kiradi. Ushbu siklda tindirish filtri (2) yuvish bosqichida bo'lib turadi. Tozalanayotgan suv suvdan Ca^{2+} , Mg^{2+} va Na^+ kationlarini olib tashlash uchun mo'ljallangan ikki kamerali H-kationit filtriga yuboriladi. Filtrlash jarayonida tindirilgan suv birinchi kameraga tarqatib beruvchi moslama orqali kirib, qattiqlik o'zgartiruvchi kuchsiz kislotali kationit qatlami orqali yuqoridan pastga o'tadi, so'ngra suv teskari yo'nalishda oraliq pastki qism orqali ko'tarilib, H^+ kationiga to'yinguniga qadar ishlaydigan kuchli kislotali kationit bilan to'ldirilgan ikkinchi kameraga kiradi. Kation almashinuv filtrlarining har biri kirish joyida konsentratsiya hisoblagichi va chiqishda vodorod konsentratsiyasi datchiki bilan jihozlangan. Oqava suvdagi vodorod konsentratsiyasi 100 mg/l dan oshganda, filtr avtomatik ravishda regeneratsiya uchun to'xtaydi. Suv sifatini nazorat qilish uchun namuna olish joyi o'rnatilgan. Shu bilan birga, ikki kamerali H-kationit filtri (4) regeneratsiya jarayonida bo'lib turadi.

(3),(4) filtrlardan keyin suv kuchli kislotali anionlarni, shuningdek kremniy kislotasi $HSiO_3^-$ va karbonat kislotasi HCO_3^- anionlaridan tozalaydigan, ikki kamerali OH-anionit filtriga (5) yuboriladi. Ion almashinadigan material sifatida birinchi kameraga kuchsiz asosli anionit D301, ikkinchi kameraga esa kuchli asosli 201x7 anioniti yuklanadi. Har bir anion almashinuv filtri kirish joyida hisoblagich, chiqishda kremniy konsentratsiyasini o'lchagich va elektr o'tkazuvchanlikni o'lchagich bilan jihozlangan. Chiqish suvlarida kremniy konsentratsiyasi 0,1 mg/l dan va elektr o'tkazuvchanligi 5 $\mu S/smdan$ oshganda filtr avtomatik ravishda regeneratsiya uchun to'xtaydi. Anionlangan suvni nazorat qilish uchun namuna olish punkti tayinlangan. Ikki kamerali OH-anionit filtri (6) regeneratsiya bosqichida bo'ladi.

Kationit turiga va filtrning ishlash sharoitlariga qarab kationit filtrni qayta tiklash uchun turli xil reaktivlardan foydalanish mumkin.

2-jadval

Ikki kamerali ion almashinuv qurilmasida tabiiy suvning yumshatishdan avvalgi va keyingi qiyosiy tasnifi

Kation tarkibi, mg-ekv/dm ³	Ca	Mg	Na	K	Fe
Ko'rsatkichlar qiymati	0,26	0,21	5.6	0,031	0,001
Ko'rsatkichlar	O'lchov birligi	Suv tayyorlash			
		avval		Keyin	
Xloridlar	mg-ekv/dm ³	32,9		32,9	
Ishqoriyligi	mg-ekv/dm ³	6,4		6,8	
Qattiqligi	mg-ekv/dm ³	7,7		0,4	
pH ko'rsatkichi		6,4		6,9	

2-jadvalda tavsiya etilgan filtrda Damxo‘ja suv omboridan olingan suvni tozalash natijalari ko‘rsatilgan.

Ikki kamerali apparatning ishlash parametrlari 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

Ishlab chiqilgan suvni tuzsizlantirish qurilmasining ishlash parametrlari

Ko‘rsatkichlar	Belgilanishi	O‘lchov birligi	Sonli qiymati
Qurilmaning diametri	D	m	1,5
Ionitning balandligi	H	m	1,5
Suvning hajmiy sarfi	Q	m ³ /soat	100
Suvning qattiqligi	C _q	mg-ekv/l	7
Qurilmadagi kationitning miqdori	V	m ³	2,6
«To‘yinish»gacha qurilmaning ishlashi	τ	soat	6
Regeneretsiya uchun eritma			Sulfat kislotasi
Eritmaning konsentratsiyasi	S _p	mg-ekv/l	0,93
Sulfat kislotasini berish tezligi	W _p	m ³ /soat	10
Regeneratsiya jarayonining vaqti	τ _p	min	172

Shunday qilib, tabiiy suvni tozalashning tavsiya etilgan sxemasi ishonchli va barqaror ishlaydi. Ushbu qurilmalar issiqlik va massa almashinuv qurilmalarini kimyoviy tozalash uchun zarur bo‘lgan unumdorlikni sezilarli darajada oshirish imkoniyatini beradi.

XULOSA

1. Ikki qisimli natriy kationit filtrida suvni yumshatish bosqichining matematik modeli ishlab chiqilgan bo‘lib, u ionit qatlami orqali suyuqlikning kirib borishining gidrodinamik xususiyatlarini hisobga olgan holda ion almashinuvining ham kinetik, ham muvozanat shakllarini hisobga olishga imkon beradi.

2. Modeli ishlab chiqildi va ikki qisimli kationit filtrida “sorbsiya-regeneratsiya” to‘liq siklini hisoblash amalga oshirildi, bu esa filtrning sorbsiya va regeneratsiya bosqichlarida optimal ish vaqtini hisoblash, regeneratsiya eritmasining optimal konsentratsiyasini tanlash, filtdan o‘tadigan qattiqlik ionlarining momentini taxmin qilinish imkonini beradi.

3. Qurilgan model va uni yechish algoritmi ion almashinuv qurilmasida ionitning sorbsiya jarayonini bashorat qilish uchun ishlatilishi mumkin, bu esa ishni o‘z vaqtida boshqa qismga o‘tkazishda qattiqlik ionlarning filtdan o‘tgan momentini taxmin qilish, shuningdek kationit resursini (almashtirish zaruratigacha

bo‘lgan vaqt) bashoratlash va uning eskirishiga ta’sir etuvchi omillarni hisobga olish imkonini beradi.

4. Issiqlik uskunalari devorlaridagi cho‘kindi qatlamlarning mineral tarkibi tajribaviy tarzda aniqlash o‘tkazildi, bu esa cho‘kindilarning paydo bo‘lish sabablarini tushunish, uskunaning ishlashini optimallashtirish va issiqlik uskunalari tozalashda eng samarali usulni tanlash imkonini beradi.

5. Turli sanoat korxonalarining qozon va issiqlik uskunalari aniqlangan cho‘kindi qatlamlarning elementar tarkibi aniqlandi. Bu cho‘kindilarda qaysi mineral birikmalar ustunligini aniqlash imkonini beradi.

6. Turli sanoat korxonalarining issiqlik almashinuvchilari va aylanma suv ta’minoti quvurlari yuzalaridagi cho‘kindi qatlamlarning kimyoviy tarkibi aniqlandi, bu muammoning manbasini ko‘rsatadi - masalan, suvda kalsiy va magniy konsentratsiyasining ortishi (qattiqligi), temir, tuzlar, organik moddalar va boshqalarning mavjudligi.

7. Suvni sifatli yumshatishni ta’minlovchi ikki kamerali ion almashinuv filtri qurilmasi ishlab chiqildi va yaratildi, bu esa aylanma suv ta’minoti tizimidagi uskunalarining samaradorligi va ishonchliligini oshiradi.

8. “ELEKTRKIMYOZAVOD” qo‘shma korxonasida iqtisodiy samaradorligi yiliga 388 mln 977 ming so‘m bo‘lgan dissertatsiya ishining natijalari tatbiq etildi.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ НА ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА
DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ЮНУСОВА НИЛУФАР АБДУСАМИ КИЗИ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ ВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**02.00.16 – Процессы и оборудование для химической технологии и производства
пищевых продуктов (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент-2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2023.1.PhD/T1632.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.tdtu.uz) и информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Нурмухамедов Хабибулло Саъдуллаевич**
доктор технических наук, профессор

Самандаров Достон Ишмухаммат угли
доктор философии по техническим наукам (PhD)

Ведущая организация: **Навоийский государственный горно-технологический университет**

Защита диссертации состоится «__»_____2024 г. в __ часов на заседании Научного совета Dsc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - ____). (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская кўчаси, 2. Тел.: (99871)207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «__»_____2024 года.

(протокол реестра №__ от «__»_____2024 года).

Н.Р.Юсупбеков

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

У.Ф. Мамиров

Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н, профессор

Ш.М.Гулямов

Председатель научного семинара при научном совете
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Введение (аннотация к диссертации доктора философии (Phd))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире много внимания уделяется научным разработкам, связанным с умягчением и обессоливанием воды, используемых в системе оборотного водоснабжения. Упаривание воды с высокой жесткостью в системе оборотного водоснабжения и его постоянная подпитка приводит к образованию трудноудаляемых из труб и оборудования прочных карбонатных отложений. Накипь имеет высокие механические свойства и достаточно низкую теплопроводность, что приводит к увеличению расхода тепловой энергии и затрат на эксплуатацию теплотехнического оборудования.

В мире в настоящее время ведутся исследования в различных направлениях, связанных с проблемой необоснованного перерасхода топлива и энергии, вызванного неэффективной работой технологического теплообменного оборудования: разработка эффективных методов и технологий теплообмена, применение высокоэффективных материалов, применение современных методов компьютерного моделирования. В связи с этим необоснованный перерасход энергии является важной и актуальной проблемой, с которой сталкиваются в различных отраслях промышленности, включая энергетику, химию и др., В результате чего происходит негативное воздействие на предприятия и государственные бюджеты в целом, поскольку ведет к увеличению затрат производства и потребления.

В Республике в системе оборотного водоснабжения промышленных предприятий особое внимание уделяется продлению срока службы теплотехнических устройств, что напрямую связано с образованием слоев отложений, затрудняющих процесс теплообмена и приводящих к преждевременному выходу из строя теплообменного оборудования. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы определены задачи «снижения потерь в отраслях промышленности и повышения эффективности использования ресурсов, внедрения современных энергосберегающих технологий, ... финансирования проектов по повышению энергоэффективности»¹. Для выполнения этих задач, в том числе создания устройства умягчения и опреснения воды для повышения эффективности теплообменного оборудования, повышения его эффективности и внедрения на практике, является одной из актуальных задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Постановлениями ПП- №3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», ПП- № 4265 от 3 апреля 2019 года «О мерах по дальнейшему реформированию и повышению инвестиционной привлекательности химической промышленности», в Указе Президента Республики Узбекистан УП-№ 4947 от

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022г. №УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», и УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы», а также других нормативно-правовых документов в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики II: «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Проблемы, связанные с решением вопросов по обновлению и усовершенствованию технологии умягчения воды, преследующие цель предотвращения образования накипи на поверхностях теплового оборудования, глубоко изучаются в образовательных и исследовательских учреждениях мира, в том числе, в Stanford University (США), Cranfield University (Великобритания), Nanyang Technological University (Сингапур), Delft university of technology (Нидерландия), Engineering Institute of technology (Австралия), Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (Россия), Ташкентском государственном техническом университете и Ташкентском химико-технологическом институте (Узбекистан). Следует отметить, что учеными всего мира проведены многочисленные научные исследования по разработке эффективных технологий и аппаратурного оформления процессов умягчения воды, используемой в теплотехнических системах.

Проблемой умягчения воды занимались следующие зарубежные ученые: Obertas I.A.² (Украина), Михайлов В.Г.³ (Россия), Apell J.N.⁴, Boyer T.H.⁴ (США), Zhao G.⁵, Wu X.⁵, Tan X.⁵, Wang X.⁵ (Китай) и другие, существенный вклад внесли также отечественные ученые: Мухиддинов Д.Н.⁶, Юсупбеков Н.Р.⁷, Мухиддинов Д.П.⁷, Турабджанов С.М.⁸, Рахимова Л.С.⁸, Юсупалиев Р.М.⁹ и др. Ими внедрены в производство результаты научных исследований, основанные на использовании различных методов, позволяющих уменьшать жесткость воды, являющейся основным источником

² Obertas I.A.: Modeling of water softening processes on cation exchangers. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine 10/2007, 134–138.

³ Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования: производственно-практическое издание. М.: ДеЛи принт, 2004. 152 с.

⁴ Apell J.N., Boyer T.H.: Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness. Water Res. 44, 2010, 2419–2430.

⁵ Zhao G., Wu X., Tan X., Wang X. Sorption of heavy metal ion from aqueous solutions: A review. Open Colloid Sci. J. 2011. N 4. P. 19-31.

⁶ Mukhitdinov D.N. New methods for obtaining quality drinking water in a water treatment plant // Chemical Technology, Control and Management, vol. 2020, issue 3, Art. 2, -PP: 10-14.

⁷ Yusupbekov N.R., Muxitdinov D.P. Texnologik jarayonlarni modellashtirish va optimallashtirish asoslari. – Toshkent: “Sano-standart”, 2019. 480 bet

⁸ Turabjanov S.M., Rakhimova L.S. Synthesis of phosphoric acid cationexchange polymer of polycondensation type // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. №1-2, -PP: 111-113.

⁹ Yusupaliyev R.M. Issiqlik elektr stansiyalarida suv tayyorlash texnologiyasi va kimyoviy nazorat. – Toshkent: “Sano-standart”, 2013. 288 bet.

образования накипи в системах отопления и другом технологическом оборудовании.

Однако, несмотря на достигнутые значительные успехи, недостаточно уделено внимания вопросам разработки устройств и технологий умягчения воды на основе ионного обмена, при котором ионы кальция и магния заменяются на натриевые ионы, что позволяет снизить жесткость воды и предотвратить образование накипи.

Связь диссертационного исследования научно-исследовательских работ с планами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета на тему ОТ-Ф7-88–«Совершенствование теоретических основ перспективных энерго- и ресурсосберегающих тепло- и массообменных процессов сложных химико-технологических систем получения чистых продуктов» (2017-2020 гг.).

Целью исследований является математическое моделирование и усовершенствование установки умягчения воды, используемой в процессе теплообмена в оборотном водоснабжении промышленных предприятий.

Задачи исследования:

проведение анализа современного состояния систем оборотного водоснабжения и проводимых в них процессов умягчения и обессоливания воды;

проектирование и изготовление экспериментальной установки для проведения опытов по повышению эффективности процессов тепло- и массообмена в оборотном водоснабжении;

разработка математической модели стадии умягчения воды в двухсекционном натрий-катионитном фильтре с учетом как кинетических, так и равновесных закономерностей ионного обмена;

разработка методики расчета основных технологических характеристик умягчения и обессоливания воды;

исследование влияния умягчения и обессоливания воды на сокращение расхода тепловой энергии, простоев и издержек на техобслуживание;

Объектом исследования являются установки в технологической схеме обессоливания и умягчения воды.

Предметом исследования являются конструкция и расположение элементов установки для обеспечения равномерного распределения потока воды и максимально эффективное использование ионообменной смолы.

Методы исследования. Для достижения цели исследования использованы физическая и математическая модель процесса умягчения воды, методы математического моделирования и алгоритмизации, численные и экспериментальные методы исследования гидродинамических и тепловых процессов, а также методы математической обработки полученных результатов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана математическая модель стадии умягчения воды в двухсекционном натрий-катионитном фильтре, позволяющая учитывать, как кинетические, так и равновесные его закономерности ионного обмена с учетом гидродинамических особенностей проникновения жидкости через слой ионита;

на основании законов химии, физики и гидродинамики, описывающих процессы ионообмена, адсорбции, диффузии и фильтрации, разработана модель, позволяющая производить расчет процесса регенерации в установке умягчения воды;

на основе метода конечных элементов - PDE Toolbox, делящего систему на дискретные элементы, что позволяет моделировать неоднородности и сложные геометрические формы, разработан алгоритм, обеспечивающий решение системы уравнений математического описания полного цикла «сорбция-регенерация» в установке умягчения воды;

разработано устройство, позволяющее определять динамику изменения концентрации солей Ca и Mg во времени и времени процесса регенерации при умягчении воды.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана и изготовлена установка умягчения воды, проиллюстрирована целесообразность и перспективы ее использования;

разработаны алгоритмы решения системы уравнений модели стадий умягчения воды и регенерации ионита в двухсекционном натрий-катионитном фильтре двумя методами;

экспериментально установлена связь процесса образования и состава накипи с химическим составом природной воды;

определен минеральный состав отложений на стенках теплового оборудования и предложен метод предотвращения отложений на основе ионообменного метода умягчения воды;

определено, что скорость образования накипи в теплообменниках зависит от жесткости воды, температуры, pH воды, содержания углекислого газа, давления и турбулентности потока.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается соответствием исследования общепринятым принципам научных методов, применением теоретически достоверных методов математического моделирования, корректностью выбора методов анализа, логической последовательностью полученных результатов и согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов диссертационной работы обоснована тем, что в двухкомпонентном катионит-натриевом фильтре разработана математическая модель процесса умягчения с учетом кинетических и равновесных закономерностей ионного обмена, а также гидродинамических особенностей проникновения жидкости через слой ионита.

Практическая значимость результатов исследований объясняется тем, что двухкомпонентный ионообменный фильтр является разработанным устройством умягчения воды, обеспечивающим качественное умягчение воды, повышение эффективности и надежности оборудования в системе циркуляционного водоснабжения, а также целесообразностью и перспективностью его использования.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по совершенствованию установки умягчения воды, используемой в процессе теплообмена в системе оборотного водоснабжения промышленных предприятий:

разработан алгоритм решения системы уравнений для математического описания полного цикла «сорбция-регенерация» в устройстве умягчения воды (Справка СП-АО «Электрохимзавод» № 014 от 5 января 2024 года). В результате это позволило решить систему нелинейных дифференциальных уравнений и повысить точность оценки результатов.

на основании экспериментальных исследований, проведенных с целью предотвращения образования отложений внедрена испытательная установка двухкамерного ионообменного фильтра умягчения воды на АО «Электрохимзавод» (Справка СП-АО «Электрохимзавод» № 014 от 5 января 2024 года). В результате удалось снизить расход регенерационного раствора и объем воды, улучшить качество умягчения воды, повысить эффективность и надежность оборудования системы оборотного водоснабжения.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 2 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 12 научных работ. Из них 6 научных статей опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации научных результатов диссертаций, а также получено свидетельство об официальной регистрации программного продукта для ЭВМ Агентством интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка библиографии и приложений. Объем диссертации составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения о

внедрении в практику результатов исследования по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Анализ современного состояния проблем умягчения воды в аппаратах со слоем ионита**» произведен аналитический обзор научной литературы о существующих методах подготовки воды для оборотного водоснабжения на промышленных предприятиях, представляющих собой сложный технологический процесс, обоснован выбор ионообменного метода подготовки воды для оборотного водоснабжения, рассмотрены методы моделирования подобных аппаратов. На основании проведенного аналитического обзора сформулирована уточненная цель диссертационного исследования, заключающегося в совершенствовании установки умягчения воды ионообменным методом, и разработке математической модели процесса умягчения с учетом кинетических и равновесных закономерностей ионного обмена. В результате чего и поставлены задачи исследования.

Во второй главе диссертации «**Математическая модель процесса ионного обмена в двухсекционном аппарате**» разработана математическая модель стадии умягчения воды в двухсекционном натрий-катионитном фильтре и разработан алгоритм его решения. Математическое описание процесса сорбции ионита с учетом принятых допущений включает уравнения, учитывающие материальный баланс, кинетику диффузии в ячейку сферической формы, нелинейную изотерму, и уравнения, отражающие связь локальной концентрации вещества в твердой фазе с ее средним значением (1)-(4):

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_{cp}}{\partial \tau} + v \varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = \bar{D}_{\phi} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\bar{C}_p = f(C), \quad (3)$$

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr. \quad (4)$$

Кроме приведенных уравнений в состав математического описания входят начальные и граничные условия:

$$C(\tau, x)|_{\tau=0} = C_0, \quad (5)$$

$$C(\tau, x)|_{x=0} = C_{BX}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (7)$$

$$C(\tau, r)|_{\tau=0} = \bar{C}_0(r), \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{\beta}{D_{\phi}} (C - C_{cp}), \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (10)$$

Решение модели начинаем с решения неоднородного дифференциального уравнения (1) в частных производных с учетом начальных и граничных условий (уравнения (5) - (7)).

$$\varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau, x) + (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} C_{sp}(\tau, x) + \nu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(\tau, x) = Dp \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau, x) \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} C(0, x) = C_0 \\ C(\tau, 0) = C_{\nu x} \end{array} \right\}, \quad \frac{\partial}{\partial x} C(\tau, H) = 0$$

Используя метод Фурье, будем искать решение данной задачи в следующей форме:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} C_n(\tau) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \quad (12)$$

Полагая, что функция $C(\tau, x)$ разлагается в ряд Фурье относительно переменной x , и подставляя соотношение (12) в уравнение (11), получим:

$$\varepsilon \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{d}{d\tau} C_n(\tau) \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \right) + (1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial}{\partial \tau} C_{sp}(\tau, x) \right) + \nu \varepsilon \left(\frac{\partial}{\partial x} C(\tau, x) \right) = Dp \varepsilon \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau, x) \right)$$

Из этого уравнения следует, что:

$$\frac{d}{d\tau} C_n(\tau) + \frac{Dp \varepsilon \pi^2 n^2}{H^2} C_n(\tau) = 0 \quad (13)$$

Откуда определяем значение: $C_n(\tau) = C_n(0) e^{-\frac{Dp \varepsilon \pi^2 n^2 \tau}{H^2}}$

На основании начальных условий (5)-(6)-(7) для $C_n(\tau)$ при $\tau = 0$ получаются начальные условия для $C_n(\tau) = 0$. Отсюда можно вывести уравнение, удовлетворяющее начальным условиям уравнения (13):

$$C_n(\tau) := \int_0^{\tau} t e^{-\frac{Dp \varepsilon \pi^2 n^2 (t-\tau)}{H^2}} dt$$

Подставляя полученный результат в соотношение (12), определим решения начальных и граничных условий уравнения (11) в виде:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_0^{\tau} t e^{-\frac{Dp \varepsilon \pi^2 n^2 (t-\tau)}{H^2}} dt \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) \quad (14)$$

Если, при этом, начальные условия не будут равны нулю, тогда при решении уравнения (14) необходимо добавить условия, удовлетворяющие решению начальных и граничных условий однородного уравнения $C(\tau)|_{x=0} = \varphi(x)$.

Полученный результат можно представить в виде следующей функции Грина:

$$C(\tau, x) := \int_0^{\tau} \int_0^H G(x, \xi, t, \tau) d\xi d\tau$$

Тогда уравнение (14) преобразуется в функцию следующего вида:

$$G(x, \xi, \tau, t) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2e^{\frac{Def\pi^2 n^2 (\tau-1)}{H^2}} \sin\left(\frac{\pi n \xi}{H}\right) \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{H}$$

Таким образом, решение уравнения (11) с учетом начальных и граничных условий примет форму:

$$C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right) e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} \right) - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi n x}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3}$$

Рассмотрим решение кинетического неоднородного дифференциального уравнения диффузии (2) с учетом начальных и граничных условий (8)-(10):

$$\frac{\partial}{\partial \tau} Ct(\tau, r) = Def \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} Ct(\tau, r) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, r) \right),$$

$$Ct(0, r) = Ct[0](r),$$

$$\frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, r0) = \frac{\beta}{Def} (C - Cgr)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} Ct(\tau, 0) = 0$$

Воспользовавшись методом Фурье, решение этой задачи можно представить в виде следующего соотношения:

$$G(r, ri, \tau, t) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2e^{\frac{Def\pi^2 n^2 (\tau-1)}{H^2}} \sin\left(\frac{\pi n ri}{H}\right)}{H}$$

В этом случае решение уравнения (2) с учетом начальных и граничных условий (8)-(10) можно представить в виде:

$$Ct(\tau, r) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu \sin\left(\frac{1}{7} r\right) \tau H^2 (2r + (-1)^{n+1} r - H + H(-1)^n) (e^{\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}} - 1) e^{-a\tau} \sin\left(\frac{\pi n r}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3}$$

Вторая составляющая уравнения (1) определяет величину стока, зависящую от межфазного переноса. Решение уравнения кинетики с учетом начальных и граничных условий и интегрирование результата с помощью уравнения (4) позволяют определить величину стока. Аналогия задачи определения теплопроводности тел сферической формы при условии неравномерного распределения концентрации целевого компонента с решаемой задачей позволяет получить решение в следующем виде:

$$C(\tau) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\frac{1}{n^3} (25801.22755e^{-0.25000000000\tau} \sin(0.1428571429r)\tau(-1.r + r \cos(3.141592654n)) + 100. - 100. \cos(3.141592654n)) (e^{0.00002467401100n^2\tau} - 1.) \sin(0.01570796327nr))}{n^3}$$

Таким образом, решение системы уравнений, приближенно описывающее процесс ионообменного умягчения воды, преобразуется в систему:

$$\begin{cases} \bar{C}_{i,j} = mC_{i,j} + u \\ C(\tau, x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right) e^{-\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right) e^{-\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}}}{Def\pi^3 n^3} \right) - \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2 \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{2+n} H^2 \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} \right) \\ Ct(\tau, r) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu \sin\left(\frac{1}{7}r\right) \tau H^2 (2r + (-1)^{n+1}r - H + H(-1)^n) (e^{-\frac{Def\pi^2 n^2 \tau}{H^2}} - 1) e^{-a\tau} \sin\left(\frac{\pi r}{H}\right)}{Def\pi^3 n^3} \\ C(\tau) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\frac{1}{n^3} (25801.22755e^{-0.25000000000\tau} \sin(0.1428571429r)\tau(-1.r + r \cos(3.141592654n)) + 100. - \\ - 100. \cos(3.141592654n)) (e^{0.00002467401 100n^2 \tau} - 1.) \sin(0.01570796327nr))}{n^3} \end{cases}$$

Для решения этой системы использован метод конечных элементов - PDE Toolbox.

На основании построенного алгоритма решения модели проведены расчеты по сорбции ионов $CaCl_2$ на катионите КУ-2-8(Na). На рис. 1 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Сравнение результатов экспериментально определенных точек и кривой, полученной расчетным способом, показывает, что расчетные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

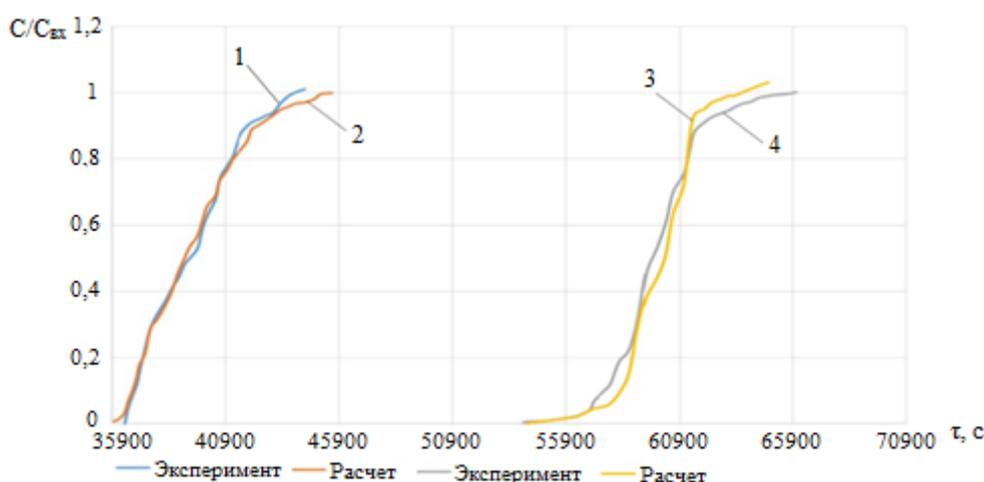


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений кривых сорбции Ca^{2+}

1,2-расчетные и экспериментальные данные при $C_{вх}=0,2н$;

3,4- расчетные и экспериментальные данные при $C_{вх}=0,09н$;

Таким образом, разработана математическая модель, описывающая процесс конвективной диффузии и адсорбционного массопереноса ионов в однородной среде с частицами микропористой структуры, позволяющая более точно производить расчет распределения концентраций компонентов.

Далее строилось математическое описание процесса регенерации сорбента на основе следующих допущений:

- скорость ионообменного процесса ограничивается и внешней, и внутренней диффузией;
- одномерное течение жидкой фазы в аппарате зависит только от координаты x ;
- изменение концентрации раствора является функцией средней скорости движения жидкой фазы только продольного перемешивания и массообменного процесса между ионитом и раствором, равновесие которого описывается уравнением линейной изотермы Генри;

Математическое описание процесса регенерации сорбента, учитывающее вышеуказанные допущения, выглядит следующим образом: уравнение материального баланса:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_{cp}}{\partial \tau} + v \varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

уравнения, отражающего кинетику диффузии в частицу сферической формы:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = \bar{D}_{\phi} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right)$$

уравнения нелинейной изотермы Генри: $\bar{C}_p = fC$

уравнения, отражающего связь локальной концентрации вещества в твердой фазе с ее средним значением

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr$$

В состав математического описания входят начальные и граничные условия:

$$C(\tau, x)|_{\tau=0} = C_0, \quad C(\tau, x)|_{x=0} = C_{BX},$$

$$\frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = 0, \quad C(\tau, r)|_{\tau=0} = \bar{C}_0(r),$$

$$\frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{\beta}{D_{\phi}} (C - C_{cp}), \quad \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0;$$

Для решения этого математического описания, как и в случае процесса сорбции, слой ионита по всей высоте аппарата разбит на элементарные слои каждый высотой $h = H/\eta$. Время проведения технологического процесса будет выглядеть в виде последовательно соединенных временных интервалов. После соответствующих преобразований для решения этой модели использован метод конечных элементов - PDE Toolbox.

В табл. 1 приведены рассчитанные по приведенной модели значения и экспериментальные данные по регенерации катионита. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от расчетных не превышает 16%.

В конце главы приведено моделирование и расчет полного цикла «сорбция-регенерация» в установке умягчения воды, схема которого представлена на рис.2.

Таблица 1.

Экспериментальные данные и рассчитанные по разработанной модели значения по регенерации катионита

Обмен $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$			Обмен $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$		
Время τ , с	$C/C_{\text{ВХ}}$		Время τ , с	$C/C_{\text{ВХ}}$	
	эксперимент	расчет		эксперимент	расчет
1	2	3	4	5	6
240	0,680	0,678	180	0,698	0,721
300	0,633	0,629	240	0,679	0,701
360	0,574	0,567	300	0,644	0,679
...
660	0,271	0,268	600	0,467	0,488
720	0,198	0,189	660	0,413	0,449
780	0,143	0,147	720	0,387	0,407
...
1020	0,084	0,098	960	0,238	0,252
1080	0,081	0,089	1020	0,211	0,233
1140	0,078	0,081	1080	0,192	0,200
1320	-	0,007	1260	0,075	0,081
-	-	-	1320	0,009	0,012

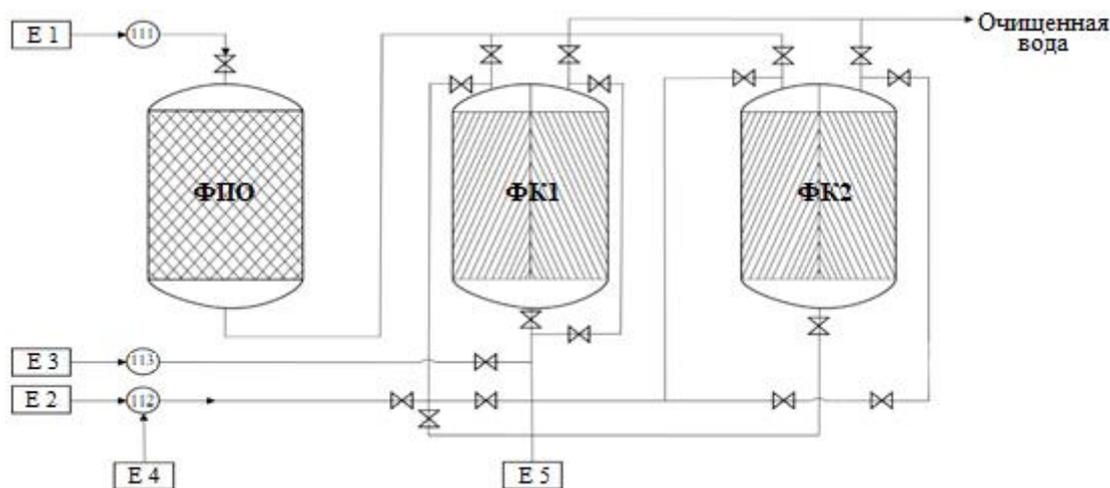


Рис. 2. Схема полного цикла умягчения воды
ФПО - фильтр предварительной очистки; ФК₁-ФК₂ – двухкамерные
фильтры.

Математическое описание полного цикла «сорбция-регенерация» в аппарате умягчения воды с неподвижным слоем ионита состоит из уравнений:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{c}_{cp}}{\partial \tau} + v\varepsilon \frac{\partial c}{\partial x} = D_{\pi} \varepsilon \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \bar{D}_{\text{эф}} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right), \quad (16)$$

$$\bar{C}_p = f(C), \quad (17)$$

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(\tau, r) dr. \quad (18)$$

соответственно материального баланса, кинетики диффузии, нелинейной изотермы и уравнения связи, отражающего связь локальной концентрации $\bar{C}(\tau, r)$ с ее средней составляющей $\bar{C}_{cp}(\tau)$. Система включает также начальные и граничные условия:

$$C(\tau, x)|_{\tau=0} = C_0(x), \quad (19)$$

$$C(\tau, x)|_{x=0} = C_{BX}, \quad (20)$$

$$\left. \frac{\partial C(\tau, x)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (21)$$

$$\bar{C}(\tau, r)|_{\tau=0} = \bar{C}_0(r), \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{\beta}{\bar{D}_{\text{эф}}} (C - C_{\text{гр}}), \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (24)$$

Решим систему уравнений (15) – (24) по разработанной методике. Для этого воспользуемся нелинейным уравнением изотермы Никольского,

$$\bar{C} = a_0 \frac{\kappa C}{1 + \kappa C}$$

Высота слоя ионита H определяется по числу единиц переноса m_L , так как чем больше единиц переноса, тем больше слоя ионита нужно для переноса ионов из воды. Чем больше число единиц переноса, тем эффективнее процесс освобождения от нежелательных ионов. Число единиц переноса показывает изменение высоты единицы переноса в жидкой фазе. Далее разбиваем слой ионита по высоте на элементарные слои каждый высотой $h = H/\eta$. Время проведения технологического процесса представляем в виде последовательно соединенных временных интервалов, а концентрацию раствора записываем в виде C_{ij} , где индекс i показывает номер слоя ионита, а j – временной интервал. Допускаем возможность замены функции $\bar{C}_0(x)$ на η функций. Проведенная замена функций позволяет провести замену начального условия (19)

уравнением $C(\tau, x)|_{\tau=0} = C_{0,i} = \text{const}$ и уравнения (22) для уравнения

диффузии – уравнением $\bar{C}(\tau, r)|_{\tau=0} = \bar{C}_{0,i}(r)$.

Введенные изменения дают возможность сведения постановки задачи расчета неравновесной динамики ионообменного процесса при неравномерном начальном распределении концентрации целевого компонента

в аппарате адсорбции в обеих фазах к задаче расчета пространственно-временного распределения концентрации раствора в аппарате адсорбции с равномерным начальным распределением концентрации.

После соответствующих замен и преобразований получаем формулу расчета функции $C^c(x, \tau)$ для i -го слоя ионита установленной высоты и j -го временного интервала:

$$\frac{C^c(\tau, X)}{C_{BX}} = - \frac{e^{-\frac{v^2}{2D_{II}}(\frac{\tau-X}{v})}}{C_{BX}} \left\{ \bar{K}_j \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_k \frac{X}{h}) e^{\frac{v^2}{4D_{II}} \tau}}{d_k R_k^2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_k \frac{X}{h}) e^{-\frac{D_{II} \lambda_k^2 \tau}}{h^2} \left[\left(\frac{C_{BX} - C_0}{C_{BX}} \right) \lambda_k^2 R_k - \bar{K}_j \lambda_k^3 \right]}{d_k R_k^2} \right\}$$

Интегрирование полученных решений дает представление о динамике распределения концентрации компонентов в аппарате с неподвижным слоем сорбента.

В третьей главе диссертации «Экспериментальное определение минерального состава отложений на стенках теплового оборудования и предотвращение отложений ионообменным методом умягчения воды» изучался состав накипи на внутренних поверхностях котельного оборудования и труб отдельных предприятий Ташкентской, Кашкадарьинской и Навоийской областях республики. С этой целью отбирались пробы с внутренней поверхности металлических труб и теплообменников после их вскрытия. Отбор проб сопровождался фиксацией места отбора пробы, материала трубопровода или теплообменника, технологические параметры эксплуатации теплотехнического оборудования (период эксплуатации оборудования, температурный режим, максимальное и минимальное значения температуры, давление в трубопроводах и теплообменниках, а также производительность оборудования). Изучался состав воды, используемой промышленным предприятием, до и после умягчения.

Для определения распределения различных химических соединений и минералов в отложениях, которые образуются в технологических процессах, химического состава, кристаллической структуры и морфологии отложений использованы методы рентгеновской дифрактометрии (XRD). Рентгеновская дифрактометрия (XRD) — это метод, который использует рентгеновские лучи для измерения распределения различных минералов в отложениях. Образец отложений помещается на детектор, и рентгеновские лучи проходят через образец, создавая дифракционную картину, которая может быть анализирована для определения состава минералов.

Количественное содержание фаз определялось с помощью пакета прикладных программ Crystallographica Search-Match.

Состав образцов воды, взятых с различных предприятий, определялся на основе стандартных методик. Далее определяли химический состав накипи на поверхностях теплообменников и труб оборотного водоснабжения. Накипь на поверхностях теплообменников и труб оборотного водоснабжения обычно

состоит из различных минеральных солей, которые находятся в воде. Состав накипи может варьироваться в зависимости от местоположения и условий эксплуатации системы. Например, если вода содержит высокую концентрацию кальция и магния, то накипь может содержать соединения этих элементов, таких как карбонаты, сульфаты и хлориды. Если вода содержит высокую концентрацию железа и марганца, то накипь может содержать соединения этих элементов, таких как оксиды, гидроксиды и карбонаты.

С целью предотвращения выпадения отложений было проведено экспериментальное исследование умягчения воды ионообменным способом.

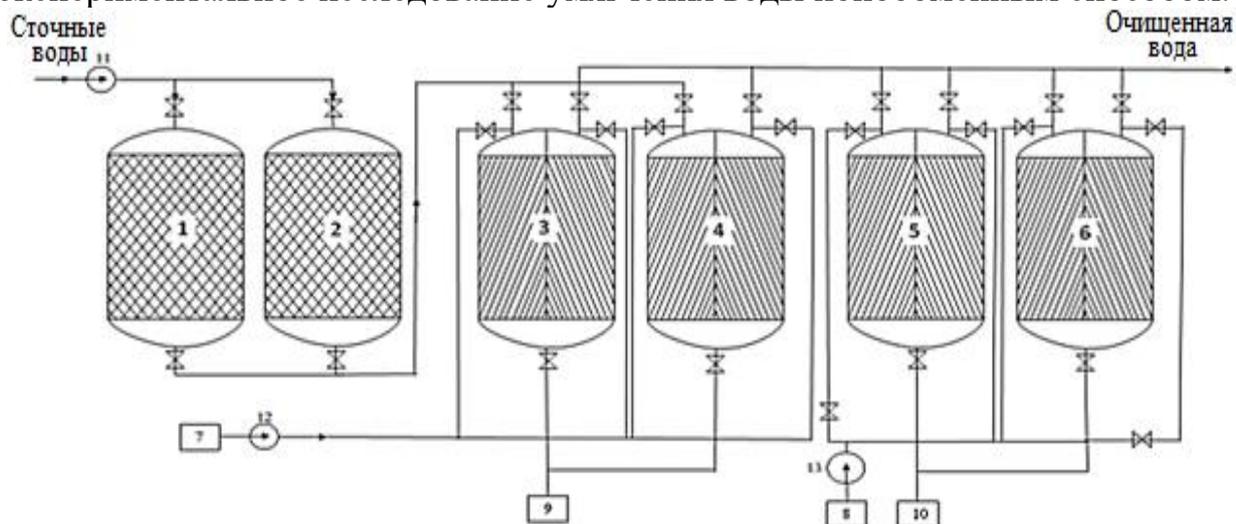


Рис.3. Технологическая схема двухкамерной установки обессоливания воды :

1,2 - осветлительные фильтры; 3,4 и 5,6 – соответственно Н-катионитные и ОН-анионитные фильтры; 7,8 и 9,10 – соответственно баки для регенерационных и отработанных растворов; 11-13 - насосы.

В предлагаемом ионообменном фильтре очистку воды осуществляют по комбинированной схеме, состоящей из двух фаз обработки. Обрабатываемая вода через насос 11 поступает в осветлительный фильтр 1, в котором находится кварцевый песок. В этом цикле осветлительный фильтр 2 находится на стадии промывки. Осветленная вода направляется в двухкамерный Н-катионитный фильтр 3, предназначенный для удаления из воды катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ . При фильтровании осветленная вода поступает в первую камеру, связанную с распределительным устройством, проходит сверху вниз через слой слабокислотного катионита, работающего до проскока жесткости, затем вода идет вверх в противоточном направлении, поступает через промежуточное днище во вторую камеру, заполненную сильнокислотным катионитом, работающим до проскока катиона Na^+ . Каждый из катионообменных фильтров оснащен счетчиком концентрации на входе и датчиком концентрации натрия на выходе. Когда концентрация натрия в сточных водах превышает 100 мг/л, фильтр автоматически останавливается для регенерации. Для контроля качества воды предусмотрена точка отбора проб. При этом двухкамерный Н-катионитный фильтр 4 находится в процессе регенерации.

После фильтров 3,4 воду направляют в двухкамерный ОН-анионитный фильтр 5, который удаляет анионы сильных кислот, а также анионы кремнекислоты HSiO_3^- и уголекислоты HCO_3^- . В качестве ионообменного материала загружают в первую камеру слабоосновный анионит D301, а на вторую камеру --сильноосновный анионит 201x7. Каждый анионообменный фильтр оснащен счетчиком на входе, измерителем концентрации кремния на выходе и измерителем электропроводности. Фильтр автоматически останавливается для регенерации, когда концентрация кремния в выходных водах увеличивается на 0,1 мг/л, а электропроводность превышает 5 $\mu\text{C}/\text{см}$. Для контроля анионированной воды предусмотрена точка отбора проб. Двухкамерный ОН-анионитный фильтр 6 находится на стадии регенерации.

Для регенерации катионитного фильтра можно использовать различные реагенты в зависимости от типа катионита и условий эксплуатации фильтра.

В табл. 2 представлены результаты очистки воды из Дамхужинского водозабора в предлагаемом фильтре.

Таблица 2.

Сравнительная характеристика природной воды до и после умягчения в двухкамерной ионообменной установке

Содержание катионов, мг- экв/дм ³	Ca	Mg	Na	K	Fe
Значение показателя	0,26	0,21	5.6	0,031	0,001
Показатели	Единица измерения	Водоподготовка			
		до		после	
Хлориды	мг-экв/дм ³	32,9		32,9	
Щелочность	мг-экв/дм ³	6,4		6,8	
Жесткость	мг-экв/дм ³	7,7		0,4	
Показатель рН		6,4		6,9	

Параметры работы двухкамерного аппарата представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Параметры работы разработанной установки обессоливания воды

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Численное значение
Диаметр аппарата	D	м	1,5
Насыпная высота ионита	H	м	1,5
Объемный расход воды	Q	м ³ /ч	100
Жесткость воды	C _ж	мг-экв/л	7
Количество катионита в установке	V	м ³	2,6
Работа установки до «проскока»	τ	ч	6
Раствор для регенерации			Серн. к-та
Концентрация раствора	C _p	мг-экв/л	0,93
Скорость подачи серной кислоты	W _p	м ³ /ч	10
Время процесса регенерации	τ _p	мин	172

Таким образом, предложенная схема очистки природной воды надежна и устойчива в работе. На этих установках обеспечивается возможность значительного повышения производительности, что необходимо при химических очистках тепло --массообменного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по диссертационной работе доктора философии(PhD)сформулированы следующие выводы :

1. Разработана математическая модель стадии умягчения воды в двухсекционном натрий-катионитном фильтре, позволяющая учитывать как кинетические, так и равновесные его закономерности ионного обмена с учетом гидродинамических особенностей проникновения жидкости через слой ионита.

2. Разработана модель и осуществлен расчет полного цикла «сорбция-регенерация» в двухсекционном катионитном фильтре, что позволяет рассчитать оптимальное время работы фильтра в режиме сорбции и регенерации, подобрать оптимальную концентрацию регенерационного раствора, предсказать момент проскока ионов жесткости через фильтр.

3. Построенная модель и алгоритм ее решения могут быть использованы для прогноза процесса сорбции ионита в ионообменном аппарате, что позволяет определить момент проскока ионов жесткости через фильтр.

4. Проведено экспериментальное определение минерального состава отложений на стенках теплового оборудования, что дает возможность оптимизации работы оборудования.

5. Определен состав элементов, находящихся в отложениях котельного и теплового оборудования различных промышленных предприятий. Это позволяет установить, какие минеральные соединения преобладают в отложениях.

6. Определен химический состав накипи на поверхностях теплообменников и труб обратного водоснабжения, что указывает на источник проблемы - повышение концентрации кальция и магния в воде и т.д.

7. Разработана и создана установка двухкамерного ионообменного фильтра для умягчения воды, обеспечивающая качественное её умягчение .

8. Результаты диссертационной работы внедрены на СП-АО «ЭЛЕКТРОКИМЁЗАВОД» с годовым экономическим эффектом 388 млн 977 тыс. сум в год.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL BASED ON THE SCIENTIFIC
COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.02
ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES
AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

YUNUSOVA NILUFAR ABDUSAMI QIZI

**IMPROVEMENT OF WATER TREATMENT PLANT FOR INDUSTRIAL
HEAT EXCHANGERS**

**02.00.16 – Processes and equipment for chemical technology and food production
(technical sciences)**

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent-2024

The topic of the dissertation of a doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2023.1.PhD/T1632.

The dissertation was completed at the Tashkent State technical university.

The abstract of dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council (www.tdtu.uz) and Information and Educational Portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser:	Mukhitdinov Djaloliddin Pakhritdinovich Doctor of technical sciences, Professor
Official opponents:	Nurmukhamedov Khabibullo Sa'dullayevich Doctor of technical sciences, Professor Samandarov Doston Ishmukhammat Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)
Leading organization:	Navoi State University of mining and technology

Defence of the dissertation will take place «__»____2024 at __o'clock at a meeting of the Scientific Council of Dsc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university. (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the information-resource center of the Tashkent state technical university (registration number__). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871)207-14-70).

Abstract of dissertation sent out on «__»____2024 year.

(mailing report №__ on «__»____2024 year).

N.R. Yusupbekov

Chairman of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor, Academician

U.F. Mamirov

Scientific Secretary of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

Sh.M. Gulyamov

Chairman of the Academic Seminar
Under the Scientific Council on awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is mathematical modeling and improvement of the water softening plant used in the process of heat exchange in the circulating water supply of industrial enterprises.

The object of research is the design and arrangement of plant elements to ensure uniform distribution of water flow and the most efficient use of ion exchange resin.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

a mathematical model has been developed for the stage of water softening in a two-section sodium-cation exchange filter, which allows taking into account both kinetic and equilibrium patterns of ion exchange, taking into account the hydrodynamic features of liquid penetration through the ion exchanger layer;

based on the laws of chemistry, physics and hydrodynamics that describe the processes of ion exchange, adsorption, diffusion and filtration, a model has been developed that allows calculating the “regeneration” process in a water softening installation;

based on the finite element method - PDE Toolbox, which divides the system into discrete elements, which makes it possible to model heterogeneities and complex geometric shapes, an algorithm has been developed that provides a solution to a system of equations for the mathematical description of the complete “sorption-regeneration” cycle in a water softening installation;

A device has been developed that makes it possible to determine the dynamics of changes in the concentration of Ca and Mg salts over time and the time of the regeneration process during water softening.

Implementation of the research results. Based on the results obtained on the improvement of the water softening device used in the heat exchange process in the circulating water supply system of industrial enterprises:

An algorithm was developed to solve the system of equations for the mathematical description of the complete cycle of “sorption-regeneration” in the water softening device (Reference PE-JSC “Electrochemical Plant” №014 dated January 5, 2024). As a result, it made it possible to solve the system of nonlinear differential equations and increase the accuracy of evaluating the results.

on the basis of experimental studies carried out in order to prevent sediment layers, a test device of a two-chamber ion exchange filter for water softening was introduced at the joint-stock company “Elektrokimyo zavod” (Reference PE-JSC “Electrochemical Plant” №014 dated January 5, 2024). As a result, it was possible to reduce the consumption of the regeneration solution and the volume of water, improve the quality of water softening, and increase the efficiency and reliability of the equipment in the circulating water supply system.

The structure and scope of the dissertation.

The dissertation work consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 118 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (часть I; part I)

1. Mukhitdinov D.N., Yunusova N.A., Daynovov I.A. New methods for obtaining quality drinking water in a water treatment plant // Chemical Technology, Control and Management, vol. 2020, issue 3, Art. 2, -PP: 10-14. Tashkent 2020. DOI: <https://doi.org/10.34920/2020.3.10-14> (05.00.00; № 12).

2. Mukhitdinov D.N., Yunusova N.A., Asretdinova M.A., Sattorov B. Analysis of existing methods for softening natural waters // International journal of advanced research in science, engineering and technology, vol. 8, issue 5, -PP: 17417-17421. India, 2021.

3. Mukhitdinov D.P., Yunusova N.A. Analysis of water treatment methods for circulating water supply in industrial plants// Chemical Technology, Control and Management, vol. 2021, issue 5, Art. 1, -PP: 9-18. Tashkent, 2021 (05.00.00; № 12).

4. Yunusova N.A. Mathematical model of the ionite sorption stage in a two-section apparatus with a fixed ionite layer// Chemical Technology, Control and Management, vol. 2022, issue 3, -PP: 65-69. Tashkent, 2022 (05.00.00; № 12).

5. Mukhitdinov D.P., Yunusova N.A. Water softening simulation in a device with a fixed ionite layer // Chemical Technology, Control and Management, vol. 2022, issue 4,5, Art. 21, -PP: 112-119. Tashkent, 2022. (ОАКнинг 2022 йил 30 сентябрдаги 471-сон қарорига асосан Scopus базасидаги хорижий илмий мақола).

6. Mukhitdinov, D.P., Yunusova N.A. Mathematical description and algorithm for solving the model of the ionite regeneration process in the ion exchange method of water softening// Chemical Technology, Control and Management, vol. 2023, issue 2, Art. 1, -PP: 5-14. Tashkent, 2023. DOI: <https://doi.org/10.59048/2181-1105.14522021>. (05.00.00; № 12).

7. Мухитдинов Д.П., Юнусова Н.А. Моделирование и расчет полного цикла «Сорбция-регенерация» в установке умягчения воды с неподвижным слоем ионита// Проблемы энерго- и ресурсосбережения.-2024. –специальный выпуск №85. -134-142. (05.00.00; № 21).

II бўлим (часть II; part II)

8. Юнусов Б.Х., Юнусова Н.А., Гофуров Х.Ж. Причины образования накипи на теплопередающих поверхностях / Международная научно – техническая конференция: «Актуальные проблемы системы электроснабжения», Ташкент, 25-26 ноября 2021 г. –С. 465-467.

9. Мухитдинов Д.П., Юнусова Н.А. «Ион алмаштирувчи филтёрда ионит сорбциялаш жараёнининг дифференциал тенламалари системасини ечиш дастури» // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги хузуридаги интеллектуал мулк агентлиги DGU №18732 06.09.2022.

10. Юнусова Н.А. Математическое описание полного цикла «сорбция-регенерация» в аппарате умягчения воды с неподвижным слоем ионита / Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в агропромышленном секторе. // Сборник научных трудов III Международной конференции. –Ташкент. ТашГТУ, 2023. –С. 254-255.

11. Юнусова Н.А. Математическое описание полного цикла «сорбция-регенерация» в аппарате умягчения воды с неподвижным слоем ионита / Международная научно – практическая конференция: «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности», Таджикистан, 25 апреля 2023 г. –С. 222-226.

12. Юнусова Н.А. Разработка математического описания модели процесса регенерации ионита в процессе умягчения воды / Международная научно-практическая конференция «XV Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», Караганда, 16-17 июня 2023 г. –С. 527-530.

Avtoreferat «Texnika fanlari va innovatsiya» jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazilib, o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o'zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturası.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog'i: 3,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 31/24.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko'chasi, 83-uy.