

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

САИДОВ ЎТКИРЖОН МАЛЛАЕВИЧ

**СУЮҚ ЭРИТМАЛАРНИНГ ФИЛЬТРАШ ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНИНИ
ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УЧУН МОДЕЛЛАР ВА ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАРИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 –Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Саидов Ўткиржон Маллаевич

Суяк эритмаларнинг фильтрлаш технологик жараёнини тадқиқ қилиш учун моделлар ва ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш. 3

Саидов Уткиржон Маллаевич

Усовершенствование моделей и вычислительных алгоритмов для исследования технологического процесса фильтрования жидких растворов. 23

Saidov Utkirjon Mallaevich

Improvement of models and computational algorithms for researching the technological process of liquid filtration solutions. 44

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 48

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

САИДОВ ЎТКИРЖОН МАЛЛАЕВИЧ

**СУЮҚ ЭРИТМАЛАРНИНГ ФИЛЬТРАШ ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНИНИ
ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УЧУН МОДЕЛЛАР ВА ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАРИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 –Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.4.PhD/T1576 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.aigi.uz) ва "Ziyonet" Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Равшанов Нормаммад

техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Джуманов Жамолжон Худойкулович

техника фанлари доктори, профессор

Болтибаев Шухратжон Комилжанович

техника фанлари бўйича фалсафа доктори

Етакчи ташкилот:

Термиз Давлат университети

Диссертация ҳимояси Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги DSc.13/30.12.2021.T.142.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, М.Улуғбек тумани, Бўз-2 мавзеси, 17А уй. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@aigi.uz)

Диссертация билан Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, М.Улуғбек тумани, Бўз-2 мавзеси, 17А уй. Тел.: (99871) 263-41-98).

Диссертация автореферати 2022 йил «___» _____ да тарқатилди.

(2022 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Н.С.Маматов

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси,
техника фанлари доктори, к.и.х.

Ф.М.Нуралиев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлар доктори, доцент

Ф.М. Нуралиев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
техника фанлари доктори, доцент

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ишлаб чиқариш объектларида (кимё саноати заводлари ва унга алоқадор тармоқларда) кенг қўлланиладиган суюқ аралашмалар ва ионланган эритмаларни филтрлаш ва тозалашнинг ностационар технологик жараёнларини ўрганишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Суюқликларни аралашмалар, технологик чиқиндилар ва оғир металллардан филтрлашнинг ностационар технологик жараёнлари – ёғ-мой, фармацевтика, машинасозлик, озиқ-овқат ва бошқа турдаги маҳсулотларни ишлаб чиқаришнинг асосий босқичларидан биридир. Ушбу технологик жараённи бошқаришни оқилона ташкил этилиши эксплуатацион харажатларни сезиларли даражада камайтиради ва ишлаб чиқариладиган маҳсулот сифатини яхшилайдди. Филтр агрегатларининг ишга яроқлилиги филтрловчи материалларнинг физик-механик ва кимёвий хусусиятлари, шунингдек, қаттиқ фаза заррачалари, гель заррачалар, ионлар ва бошқа тегишли элементларни эритмаларнинг суюқ фазасидан ажратиб олишни амалга оширадиган филтрларнинг иш режимлари билан белгиланади.

Жаҳонда суюқ ва ионланган эритмаларни турли хил параметрларнинг солиштирма оғирликлари ва натижаларга таъсирини ҳисобга олган ҳолда филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини таҳлил қилиш ва башоратлаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш соҳасида мақсадли тадқиқотлар олиб борилмоқда. Шунини таъкидлаш керакки, кўриб чиқиладиган ностационар технологик жараёнларни башоратлаш ва бошқариш масалаларини муваффақиятли ҳал қилиш ҳар доим ҳам экспериментал усуллар ёрдамида амалга оширилмайди. Шунинг учун, суюқ эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини келажакдаги тадқиқотининг энг истиқболли йўли математик моделлаштириш ҳамда ҳисоблаш тажрибасининг имкониятлари ва воситаларидан унумли фойдаланиш ҳисобланади. Мазкур илмий йўналиш назарий ва экспериментал нуқтаи назардан ҳали ҳам етарлича қайта ишланмаган. Шу муносабат билан, жаҳон илмий ва профессионал ҳамжамиятида суюқ эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини бошқариш бўйича таҳлил қилиш, башоратлаш ва қарорларни қўллаб-қувватлаш муаммоларини ҳал қилиш учун моделлар, алгоритмлар ва дастурий воситаларни ривожлантириш масалалари жуда ҳам долзарб ҳисобланади.

Республикада сўнгги йилларда қишлоқ хўжалиги ва қайта ишлаш тармоқларини ривожлантириш, жумладан, замонавий ахборот

технологияларини жорий этиш, жараёнларни бошқаришнинг автоматлаштирилган тизимларини ривожлантириш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021-йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан: «... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимларига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш, ... модернизация ва ... қишлоқ хўжалигини жадал ривожлантириш, уни сифат жиҳатидан янги босқичга кўтариш, юқори технологияли ишлаб чиқариш тармоқларини илғор ривожлантиришга қаратилган ...» вазифалари берилган. Мазкур вазифаларнинг муваффақиятли бажарилиши суюқ ионланган эритмаларни филтрлашнинг технологик жараёнларини таҳлилқилиш ва башоратлаш учун математик ва дастурий таъминотни янада ривожлантириш зарурлигини белгилайди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018-йил 19-февралдаги «Ахборот технологиялари ва коммуникациялари соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПФ-5349-сон Фармони, 2019 йил 23 октябрдаги «2020-2030-йилларда Ўзбекистон Республикаси қишлоқ хўжалигини ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида»ги ПФ-5853-сонли қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сўнгги йилларда суюқ аралашмалар ва ионланган эритмаларни филтрлаш ва тозалаш учун ностационар технологик жараёнлари бўйича тадқиқотлар олиб борилган ва етарли даражада назарий ва амалий натижалар олинган. Жумладан, хорижий олимлардан J. Wang, J.Zhang, Yu.Zhihui, C. Andre, G. Vitaly, A. Safonyk, A. Bomba, F.Boyer, C.Burkert, I.Wald, C.M.Silva, A. Sibin, A. Santos, Q. Rousseau, I.M. Petre, C.D. Nguyen, V.Moshynskiy, P.J. Monteiro, M. Xiao, S.Lucas, P.Klizas, M.J. Huntul, R.P. Hunter, R.Giot, F. Lemont, R.A. Fisher, Ю.М.Шехтман, М.Г.Токмачев, Н.А.Тихинов, И. Голубев, Ю.Лебедева, Ю.Карпова ва бошқаларнинг ишларида кўриб чиқилган.

Ўзбекистонда Ф.Б.Абуталиев, Н.Р.Юсупбеков, Н.У.Ризаев, Н.Равшанов, И.Қ.Хўжаев, Б.Хўжаёров, Ж.Махмудов, Д.Ф.Файзуллаев, Х.Х.Атаулаев, О.У.Умаров, М.Я.Рахимов, О.Ким, З.М.Маликов ва Б.Ю.Палвановлар аралашмаларни тозалаш технологик жараёнларини математик

моделлаштириш ва сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишга катта ҳисса қўшганлар.

Юқорида келтирилган ҳамда кўплаб бошқа хорижий ва мамлакатимиз олимларининг саъй-ҳаракатлари туфайли бугунги кунга қадар назарий ва амалий аҳамиятга эга бўлган муҳим натижалар олинган бўлиб, озик-овқат, ёғ-мой, фармацевтика ва агросаноат маҳсулотларини қайта ишлаш жараёнида кечадиган суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлаш ностационар технологик жараёнларини ҳар томонлама ўрганиш имконини беради. Шу билан бирга, филтрловчи материалнинг ғовакли муҳитда кольматация ва суффозияси каби муҳим омилларни ҳисобга оладиган математик моделлар ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришнинг кўплаб масалалари ҳали етарлича ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институтиилмий-тадқиқот ишлари режасининг ВА-ОТ-А3-21 «Марказга интилувчан статик классификаторни яратиш ва ишлаб чиқиш» (2017-2018); БВ-Атех-2018-9 «Атмосфера ва сув ресурсларини техноген омиллардан ҳимоялаш масалаларини ечишнинг моделлари, тақсимланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш» (2018-2020) мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади Суюқ ионли эритмаларни филтрлаш технологик жараёнларини тадқиқ қилиш учун математик моделларни яратиш, такомиллаштириш, самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуасини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини ўрганиш учун математик моделлаштириш усулларини ривожлантириш билан боғлиқ илмий ишларни таҳлил қилиш;

суюқ ва ионланган эритмаларни механик ва ионли филтрлаш технологик жараёнини тадқиқ қилиш учун математик моделнитактомиллаштириш;

кольматация ва суффозия жараёнларини эътиборга олган ҳолда ғовак муҳитда суспензияларни филтрлаш ностационар технологик жараёнларининг асосий кўрсаткичларини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун математик модель ишлаб чиқиш;

суюқ эритмаларни филтрлашда филтр устида чўкиндилар қатламини ҳосил бўлиш жараёнининг математик моделини такомиллаштириш;

кольматация, суффозия ҳамда суюқ ва ионланган эритмаларнинг чўкинди қатламини ҳосил бўлишининиобатга олган ҳолда ғовак муҳитда суспензияларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини таҳлил қилиш ва башоратлаш масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ғовак муҳитларда кольматация ва суффозия ҳамда чўкинди қатламини

ҳосил бўлишинини нобатга олган ҳолда суюқ ва ионланган эритмаларнинг механик ва ионли филтрлаш масалаларини ечиш учун дастурий воситаларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлаш бўйича мураккаб ностационар технологик жараёнлар ҳисобланади.

Тадқиқот предмети суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг технологик жараёнларини ўрганиш, таҳлил қилиш ва башоратлаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуалари ҳисобланади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида математик физика усуллари, математик моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибаси, дифференциал тенгламаларни ечишнинг сонли усуллари ҳамда объектга йўналтирилган дастурлаш технологиялари қўлланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

суюқ эритмаларни ғовак муҳит орқали механик ва ионалмашинув филтрлаш технологик жараёнининг математик модели такомиллаштирилган;

кольматация ва суффозия жараёнлари эътиборга олинган ҳолда ғовак муҳитда паст концентрланган суспензияларни филтрлашнинг математик модели ишлаб чиқилган;

суюқ эритмаларни филтрлашда филтр устида чўкиндилар қатлами ҳосил бўлиши ностационар технологик жараёни учун математик модель такомиллаштирилган;

кольматация, суффозия ва чўкинди қатламни ҳосил бўлишини эътиборга олинган ҳолда суюқ ва ионланган эритмаларни механик ва ионли филтрлаш масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

суспензиялар ва ионланган эритмаларни филтрлаш ностационар технологик жараёнини сонли тадқиқ қилиш учун математик моделлар ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

математик аппарат ва дастурий воситаларни ёрдамида суюқ ва ионланган эритмаларни қайта ишлаш технологияларида қўлланиладиган филтрлаш агрегатларининг асосий кўрсаткичлари ва параметрларини аниқланган;

эритмаларни филтрлаш усуллари аниқлаш ва филтрлаш агрегатларининг оптимал ишлаш режимини танлаш бўйича амалий таклифлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги аралашманинг ҳаракат ва концентрацияси ўзгариши тенгламаси ҳамда унинг чегаравий шартлари масса, микдор ва импульснинг сақланиш қонунлари асосида қатъий шакллантирилганлиги, сонли ҳисоблаш натижаларини лаборатория тажрибаларидан олинган маълумотлар билан солиштирилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашда ностационар технологик жараёнларининг ишлашини таҳлил қилиш ҳамда башоратлаш учун математик моделлаштириш ва ҳисоблаш

эксперименти методологиясини ривжлантириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг амалий аҳамияти суюқ ионли аралашмаларни филтрлаш ва тозалаш усулларни такомиллаштириш, шунингдек ушбу технологик жараёнларда ишлатиладиган агрегатларнинг самарадорлигини ошириш бўйича тавсиялар ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Суспензиялар ва ионли эритмаларни филтрлашнинг технологик жараёнини таҳлил қилиш ва башорат қилиш, шунингдек филтрлаш агрегатларининг асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалардан фойдаланиш асосида:

суюқ эритмаларни ғовак муҳит орқали механик ва ионалмашинув филтрлаш технологик жараёнининг математик модели «INTEGRA DD» МЧЖга доривор капсулаларни ишлаб чиқишда суюқ эритмаларни тозалаш бўйича технологик жараёнларни тадқиқ қилиш бўйича математик ва дастурий таъминот жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 24 февралдаги 33-8/1382-сон маълумотномаси). Натижада тозалаш иншоотлари филтрларининг ишлаш муддатини 8-12% га ошириш ва адсорбция харажати 5-8% га камайтириш имконини берган;

суюқ эритмаларни ғовак муҳит орқали механик ва ионалмашинув филтрлаш технологик жараёнининг математик модели Самарқанд вилояти «Сув таъминот» МЧЖда очик сув ҳавзаларида сувни тозалаш филтрлаш қурилмаларининг асосий параметрларидаги ўзгаришларни аниқлаш ва назорат қилиш учун математик ва дастурий таъминот жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 24 февралдаги 33-8/1382-сон маълумотномаси). Бунинг натижасида филтрларнинг хизмат қилиш муддатини 7-10% га ошириш, шунингдек, муҳандислик ҳисоб-китоблари учун вақт ва меҳнат харажатларини 6-10% га камайтиришга хизмат қилган;

суюқ эритмаларни ғовак муҳит орқали механик ва ионалмашинув филтрлаш технологик жараёнининг математик модели «Каттакўрғон ёғ-мой» АЖда пахта ёғини қайта ишлашнинг технологик жараёнларини тадқиқ қилиш бўйича математик дастурий таъминот ва дастурий таъминот жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 24 февралдаги 33-8/1382-сон маълумотномаси). Бунинг натижасида пахта ёғини тозалаш учун филтрларнинг ишлаш муддатини 7-10% га ошириш ва адсорбция харажатларни 2-4 %га камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур диссертация тадқиқотининг натижалари 8 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 28 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 15 та

мақола, жумладан, 9 таси хорижий ва 6 таси республика журналларида чоп этилган ҳамда 3 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 108 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва заррурияти асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазибалари белгилаб олинган, тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, олинган натижаларнинг ишончилиги асосланган, ишнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлик ҳолати ҳамда нашр этилган ишлар ва

Диссертациянинг «**Суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини математик моделлаштириш муаммолари ҳолатининг таҳлили**» деб номланган биринчи бобда сўнги ўн йилликларда суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларни ўрганиш бўйича нашр қилинган илмий ишлар таҳлили келтирилган.

Хусусан, турли хил ички ва ташқи омиллар таъсирида ғовакли муҳит орқали кўпкомпонентли суспензиялар ва ионланган эритмаларни механик ва ионли филтрлаш жараёнларини моделлаштиришнинг замонавий усуллари муҳокама қилинади. Суюқ ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларининг умумий хусусиятлари ва турли соҳаларда ишлатиладиган филтрлаш агрегатларининг ишлаш тамойиллари кўриб чиқилади. Таъкидланишича, аралашмалар таркибий қисмларининг физик-механик хусусиятларига, шунингдек қайта ишланган хом ашё ва суюқ эритмалар ҳажмларига қараб турли хил филтрлаш усуллари ва қурилмалари қўлланилади. Кўплаб табиий экспериментлар катта инвестицияларни талаб қилиши ва ҳар доим ҳам амалга оширилмаслиги сабабли, математик моделлаштириш усуллари ва замонавий ахборот технологияларидан кенг фойдаланишнинг мақсадга мувофиқдир.

Илмий ишларни таҳлил қилиш асосида суюқ ва ионланган эритмаларни статик бўлмаган филтрлаш жараёнини таҳлил қилиш ва башоратлаш муаммоларини ҳал қилиш учун ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларининг янги математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш, шунингдек қарор қабул қилишни қўллаб-қувватлаш учун филтрлаш агрегатларининг асосий кўрсаткичларини аниқлаш зарурати уларнинг фаолиятининг мақбул режимларини танлаш билан белгиланади.

Диссертациянинг «**Суспензиялар ва ионланган эритмаларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш**» деб номланган иккинчи

бобида суюқликларни ғовак муҳит орқали ион алмашинадиган филтрлаш жараёни ўрганилган. Ностационар технологик жараёнларнинг моделларини ишлаб чиқишда кўпинча филтрлаш жараёнида гел зарралари ғовакликларда филтр қисмининг бутун қалинлиги бўйлаб бир текис жойлашади деган тахмин қўлланилади. Бироқ, назарий тадқиқотлар ва экспериментал маълумотлар шуни кўрсатадики, филтрнинг турли чуқурликларида гел зарраларининг колматация даражаси бир хил эмас. Ион алмашилиш жараёни ионитнинг бутун қалинлиги бўйлаб содир бўлганлиги сабабли, ион алмашилиш филтрининг турли чуқурликларида колматация даражасини ҳисобга олган ҳолда муаммоларни ҳал қилиш алоҳида қизиқиш уйғотади.

Суюқликни ғовакли муҳит орқали филтрлаш жараёнининг математик моделларини олиш учун икки фазали муҳит тенгламаларидан фойдаланилади. Олинган математик модель хусусий ҳосилалари тенгламалар тизимлари билан ўлчовсиз шаклда тавсифланади:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + ReW \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{(1-\theta_3)} = \frac{F}{H_0^2} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{H_0 F}{Hk_0(1-\theta_3)} \frac{W}{(1-\delta)^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Re \frac{\partial \theta W}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} = \frac{k_1(k_2 + \theta_3)}{k_3 + k_4 \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \tau}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \lambda_1(\theta - \gamma \delta); \quad (4)$$

$$\frac{\partial nm}{\partial \tau} + Re \frac{\partial nW}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial \tau} = a_0 \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \beta \alpha_\tau \left(n - \frac{\alpha_1 N}{\alpha_2 - bN} \right); \quad (6)$$

$$\begin{cases} W = 1, \theta_3 = 0, \theta = e^{-b_0 x}, \delta = 0, (\tau = 0); \\ W = 1, \theta = 1, (x = 0); \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \varphi, (x = 1); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} n(x, 0) = 0, N(x, 0) = 1; \\ n(x, \tau) = 0, n(1, \tau) = \frac{n_0}{N_0} = n^0. \end{cases} \quad (8)$$

Бу ерда ва матнда қуйидаги белгилашлар қабул қилинади: V – филтратнинг ҳажми; W – филтрлаш тезлиги; θ – ҳаракатдаги аралашма суспензияларининг ҳажмли концентрацияси; θ_3 – филтр бўлимлари орқали оқиб ўтадиган

заррачалар концентрацияси; δ – фильтр ғовакликларига чўккан моддаларнинг концентрацияси; α – муаллақ ҳолда турган заррачалар концентрацияси; F – фильтр майдони; ρ ва μ – суспензиянинг зичлиги ва ёпишқоқлиги; P – агрегат колонкасидаги босим; P_0 – колонкадаги бошланғич босим; P_c – чўкинди қатламидаги босим; H – фильтрлаш колонкасининг баландлиги; H_0 – фильтрлаш колонкасининг қалинлиги; h – фильтр юзасида ҳосил бўладиган чўкинди қатламининг қалинлиги; m, k – ионитнинг ғоваклилик ва ўтказувчанлик коэффициентлари; m_1 – бошланғич ғоваклилик; m_0 – фильтрнинг ғовакликларида чўккан массанинг ғоваклиги; k_0 – иш бошланишидан олдин фильтрнинг ўтказувчанлик коэффициенти; n ва N – сорбсия устунининг узунлиги бирлигида ечимда ионларни алмашишнинг дисквалтураси концентрацияси; N_0 – сорбентни сўрилишнинг умумий ҳажми; n_1 ва n_2 – n ва N консентрациялар билан мувозанатга мос келадиган сорбсия устунининг бирлик узунлигига эритмада алмашинадиган ионларнинг мувозанатиз консентрацияси; n_0 – колоннага киритилган ионнинг эритмадаги бошланғич консентрацияси; n' – N консентрацияси билан мувозанатда бўлган эритмадаги ионларнинг консентрацияси; β – алмашинувчи ионларнинг эффектив константаси; χ – бўйлама диффузия коэффициенти; χ_b – бародиффузия коэффициенти; a и b – доимий изотерма; λ – кинетик коэффициент; γ – дисперсиянинг коэффициенти; m_0, m_1 – дастлабки ғоваклиги ва жойлаштирилган массанинг ғоваклиги; ω_1, ω_2 – колматация ва соффузия интенсивлигини тавсифловчи коэффициентлар; $|\nabla p|$ – босим градиент модули; τ – вақт; $Re = \frac{\rho F W_0}{\mu H_0}$ – Рейнольдс сони; $Eu = \frac{\rho W^2}{P_0 m}$ – Эйлер сони; $k_1 = m_1 - m_0$;

$$k_2 = \frac{1 - m_0}{\theta}; \quad k_3 = \frac{m_1}{\theta}; \quad k_4 = -k_1; \quad a_1 = \frac{a}{N_0}; \quad a_2 = \frac{1}{N_0}; \quad \varphi = \varphi_1 \frac{H_0}{W_0}; \quad b_0 = \lambda_1 m_1 H_0 \frac{1 - m_0}{W_0};$$

$$a_0 = \frac{D_L F \rho}{\mu H_0}; I_0 - \text{нолинчи тартибли Бессел функцияси}; \quad B = \frac{m_0(1 - m)}{W}; \quad G - \text{чўкма}$$

сикувчанлик модули; $G = -(1 + e) \frac{\partial P_4}{\partial e} = (1 + e) \frac{\partial P}{\partial e}$;

$P_4 = P_1 - P_2$; P_1, P_2 – чўкма қатламидаги ва фильтр тўсиғи орқасидаги ташқи босим кучининг қийматлари; u – чўкманинг ташқи акс этиш коэффициенти.

Олинган (1)-(8) моделдан фойдаланиб, суюқликларнинг ғовак мухит орқали ион алмашинадиган фильтрланишини ўрганиш, ностационар технологик жараёнларнинг асосий параметрлари ва уларнинг ўзгариш диапазонларини аниқлаш учун ҳисоблаш тизимида сонли ҳисоб-китобларни амалга ошириш мумкин.

Ғовак мухитларда суюқликларни фильтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини ўрганишда яна бир муҳим жиҳат-колматация, суффузия ва бошқа шу билан боғлиқ жараёнларни кўриб чиқишдир. Кўпгина муаллифларнинг тадқиқотларида суюқликларни ғовакли мухитда фильтрлаш муаммолари фильтр материалининг тешикларида заррачалар бирикиши

интенсивлиги, ион алмашинуви жараёни ва тўсатдан босим пасайишини ҳисобга олмасдан филтрлаш тезлигининг доимий қийматида ҳал қилинади.

Амалиёт шуни кўрсатадики, бу омиллар ўрганилаётган жараёнга ғовак муҳитининг филтрлаш хоссаларига ва филтрларнинг хизмат муддатига бевосита таъсир этиб сезиларли таъсир кўрсатади.

Шунинг учун ғовакли муҳитда суяқ филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларини энг аниқ тавсифлаш учун жараённинг гидродинамикаси ва кинетикаси қонунларига асосланган математик модел ишлаб чиқилди, бу филтрация тезлигининг ўзгариши билан ифодаланган қолматация ва соффузия ғовак муҳит ўтказувчанлигининг ўзгариши, шунингдек филтр сиртидаги чўкинди қатламнинг ҳодисаларини ҳисобга олади:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} + W \frac{\partial W}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu H_0 W}{\rho H k_0 (1-\delta)^2}; \\ \frac{\partial m\theta}{\partial \tau} + \frac{\partial W\theta}{\partial x} + \frac{\partial m\alpha}{\partial \tau} + (1-m_0) \frac{\partial m\delta}{\partial \tau} &= 0; \\ \frac{\partial \delta}{\partial \tau} &= \lambda(\theta - \gamma\delta), \quad \theta = \frac{\alpha}{1-\delta}; \\ \frac{\partial m}{\partial \tau} &= \omega_1(m_0 - m)|\nabla p| - \omega_2 m\theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial mn}{\partial \tau} + \frac{\partial Wn}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\chi_b}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \\ \frac{\partial N}{\partial \tau} &= \beta(n - n'), \quad N = \frac{n'}{a + bn'}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

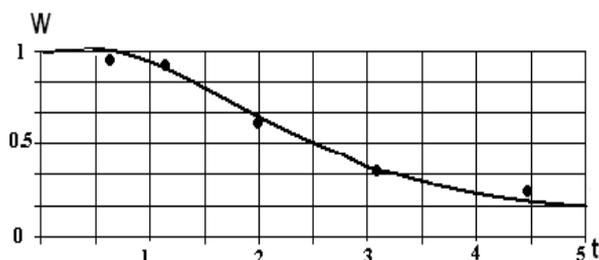
бошланғич ва чегаравий шартлар билан:

$$\left. \begin{aligned} t=0 \text{ бўлганда, } W &= 1, \quad \theta = e^{-\frac{\lambda m H_0 (1-m_0)x}{W_0}} = \varphi(x), \quad \delta = 0, \quad m = m_0; \\ x=0 \text{ бўлганда, } \frac{\partial W}{\partial x} &= \frac{H_0^3}{H k_0} \left[P_0 - \frac{W}{(1-\delta)^2} \right], \quad \theta = 1; \\ x=1 \text{ бўлганда, } \frac{\partial W}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{m H_0 \lambda (1-m_0)}{W_0} (\gamma_0 \delta - \theta). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ночизикли хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар системалари билан ифодаланган (9)-(11) масаланинг ифодасидан кўриниб турибдики, унинг аналитик ечимини олиш деярли мумкин эмас. Шунинг учун муаммонинг сонли интеграцияси учун чекли айирмали усулига асосланган рақамли алгоритм ишлаб чиқилди. Аппроксимациялаш тартибини ошириш учун $O(h^2)$ аниқликка эга бўлган вектор- айирмали схемасидан фойдаланилди.

Бобда ишлаб чиқилган математик аппаратнинг етарлилигини текшириш учун ғовакли муҳитда суспензияларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнлари параметрларини ва уларнинг ўзгариш диапазонларини аниқлаш учун компьютер тизимларида бир қатор ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди. Олинган сонли ҳисоб-китоблар натижалари Дж. Бейлиснинг

экспериментал маълумотлари билан таққосланди, улар билан тафовут 5% дан ошмади.



1-расм. Вақт бўйича филтрлаш тезлигининг ўзгаришини таққослаш (-ҳисобланган маълумотлар; * тажриба маълумотлари).

Шунингдек, эритмани ўзгармас босим қийматида филтрлаш вақтида гел заррачаларининг асосий қисми филтрнинг юқори қатламига жойлашиб, чўкма қатлам ҳосил бўлишига сабаб бўлиши аниқланган.

Ностационар технологик филтрлаш жараёнларининг дастлабки босқичларида филтр устунига суюқлик етказиб бериш тезлигининг ошиши филтр ишлашининг ошишига олиб келади, аммо кейинчалик колматация жараёни туфайли филтр блокининг коммутация вақти камаяди, бу еса филтрдаги гидравлик босимнинг ошишига олиб келади.

Бундан ташқари, бошқа муаллифларнинг кўплаб тадқиқотларидан фарқли ўлароқ, кўриб чиқилаётган жараёнда бародиффузия коэффицентининг роли ва аҳамияти аниқланди. Бародиффузия коэффиценти қийматининг ошиши билан эритма ва филтр тўсиғи ўртасида ион алмашинуви тезлиги сезиларли даражада ўзгаради. Бу, ўз навбатида, филтрнинг ишлаш вақтини қисқартиришга олиб келади.

Диссертациянинг «Паст концентрацияли суспензияларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнини сонли татқиқ қилиш» номли учинчи бобида чўкинди қатлам ҳосил бўлишини ва муаммони ҳал қилишнинг сонли алгоритмини ҳисобга олган ҳолда суспензияларни филтрлашнинг ностационар технологик жараёнларининг математик моделлари ишлаб чиқилган.

Суюқ эритмаларни тозалаш технологиясида муҳим рол ўйнайдиган асосий кўрсаткичлардан бири бу вақт ўтиши билан ўзгариб турадиган филтр бўлими орқали суюқликнинг ўтиш тезлиги. Шунинг учун ностационар технологик жараёнларни етарли даражада тавсифловчи математик моделни ишлаб чиқиш учун эритманиннг филтрлаш тезлигидаги ўзгаришларни ўз вақтида ҳам, филтр қалинлигида ҳам ҳисобга олиш керак. Ностационар технологик жараёнларни етарли даражада тавсифлаш учун филтр тўсиғи юзасида чўкинди қатлам ҳосил бўлиши, филтр ва чўкинди қатламнинг ғоваклилиги ўзгариши, бирлик устунда ва чўкинди қатлам ичида сирт босимининг ошиши каби омиллар ҳам ҳисобга олинган. Шундай қилиб, паст концентрацияли суспензияларни ўлчовсиз шаклда филтрлашнинг ностационар технологик жараёнининг математик моделини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \operatorname{Re} W \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{1-\theta_3} \frac{d\theta_3}{d\tau} = -Eu \cdot \operatorname{Re} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{HK_0}{(H_0^2 + h^2)} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{W}{(1-\theta_3)(1-\delta)^2}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{Eu} \left[\frac{m}{\operatorname{Re}(1-\delta)^2} - \frac{d\theta_3}{d\tau} \right]; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\frac{\partial \theta W}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - (1-m_0) \frac{\partial \delta}{\partial \tau} + \frac{\mu_0 \alpha_\tau}{(H_0^2 + h^2)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \lambda(\theta - \gamma \delta); \quad (15)$$

$$\theta - \theta_3 = \frac{\alpha}{1-\delta}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} = \frac{1-\bar{\theta}}{2-\delta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} + \frac{1}{2-\delta} = \left[(1-\bar{\theta}) \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial \tau} - \frac{\theta_1 W_0}{m(H_0+h)(1-\delta_1)} \right] +$$

$$+\theta_3 \left[\frac{\partial \bar{\delta}}{\partial \tau} + \frac{W_0}{m(H_0+h)(1-\theta_1)} \right] \frac{1}{2-\delta}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = FW; \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial \tau} = \frac{\partial P_1}{\partial \tau} + G \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu r} \frac{\partial P_c}{\partial x} \right]; \quad (19)$$

$$\frac{1}{u} \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial P_c}{\partial x} \Big|_{x=h(\tau)}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = -\frac{W_0 \alpha_\tau}{H_0 m} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{N_0}{nm} + \frac{\partial N}{\partial \tau} + \frac{\chi \alpha_\tau}{H^2 m} \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\alpha_\tau \chi_b}{PH_0} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \frac{\alpha_\tau \beta}{1} \left[\frac{n_0 n}{N_0} - \frac{a}{a-bNN_0} \right]; \quad (22)$$

$$P_c[h(\tau), \tau] = P_1(\tau), \quad \tau > 0 \quad (23)$$

бошланғич ва чегара шартлари билан:

$$t = 0 \text{ бўлганда } \begin{cases} \theta = e^{-\lambda H_0 B x}, & \delta = 0, \\ W = 1, \theta_3 = 0, h = 0, \\ n = 1, N = 0, P = \varphi_1, P_c = \varphi_2 \end{cases} \quad (24)$$

$$x = 0 \text{ бўлганда } \begin{cases} \theta = 1, & P = 1, & n = \frac{1}{n_0}, \\ W = 1, P_c(0, \tau) = P_2(\tau) \end{cases} \quad (25)$$

$$x = 1 \text{ бўлганда } \begin{cases} \theta(x, \tau) = \theta_0 e^{-\sigma B H_0} \left[e^{\sigma B H} I_0(2\sqrt{\sigma \gamma H_0 \tau} + \frac{1}{\sigma B H_0 I_0}) \right] (2\sqrt{\tau}) d\tau, \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{a_0 H_0}{W_0}, \frac{\partial n}{\partial x} = 0, P = \phi_3, P_c = \phi_4 \end{cases} \quad (26)$$

$$m = m_1 + \delta(m_0 - m_1).$$

Агар филтер қатламининг ғоваклиги m ўзгарувчан бўлса, яъни $m=m(x, \tau)$, кейин қўйишимиз мумкин: $\theta_3 = \delta x = 1$ бўлганда ва ундан кейин $m = m_1 + \delta(m_0 - m_1)$.

(12)-(26) масала баёнидан кўриниб турибдики, унинг аналитик ечимини топиш қийин. Сонли ечим учун биз аниқликги юқори тартибли Самарский-Фрязинов вектор схемасидан фойдаланамиз, сўнгра ҳосил бўлган тенгламалар тизимларини чекли айирма схемаси билан аппроксимациялаймиз ва (12)-(26) кўринишнинг вектор- айирма аналогини оламиз:

$$\begin{aligned} & \frac{W_{1,i} - \bar{W}_{1,i}}{\Delta \tau} + W_{1,i}^{(s-1)} \frac{W_{2,i} - W_{2,i-1}}{\Delta h} - \frac{W_i}{1 - \theta_{3,1}} \frac{\theta_{3,1} - \bar{\theta}_{3,1}}{\Delta \tau} = \\ & -Eu \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{W_{1,i+1} - 2W_{1,i} + W_{1,i-1}}{\Delta h^2} - \frac{1}{\text{Re}_1} \frac{W_{1,i}}{(1 - \theta_{3,1})(1 - \delta_{1,i})^2}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \frac{W_{2,i} - \bar{W}_{2,i}}{\Delta \tau} + W_{2,i}^{(s-1)} \frac{W_{1,i+1} - W_{1,i}}{\Delta h} - \frac{W_{2,i}}{1 - \theta_{3,2}} \frac{\partial \theta_{3,2}}{\partial \tau} = \\ & -Eu \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{W_{2,i+1} - 2W_{2,i} + W_{2,i-1}}{\Delta h^2} - \frac{1}{\text{Re}_1} \frac{W_{2,i}}{(1 - \theta_{3,2})(1 - \delta_{2,i})^2}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \frac{y_i - \bar{y}_i}{\Delta \tau} + \frac{W_{1,i} Z_i - W_{2,i-1} Z_{i-1}}{\Delta h} = 0 \\ \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{\Delta \tau} + \frac{W_{2,i+1} y_{i+1} - W_{2,i} y_i}{\Delta h} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \frac{\delta_{1,i} - \bar{\delta}_{1,i}}{\Delta \tau} = \lambda_0 (y_i - \gamma_0 \delta_{1,i}) \\ \frac{\delta_{2,i} - \bar{\delta}_{2,i}}{\Delta \tau} = \lambda_0 (Z_i - \gamma_0 \delta_{2,i}) \end{cases} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{n_{1,i} - \bar{n}_{1,i}}{\Delta \tau} + \gamma \frac{n_{2,i+1} - n_{2,i}}{\Delta h} + \beta \alpha_\tau \left(n_{1,i} - \frac{a_1 N_{1,o}}{a_2 - b N_{1,o}} \right) = \frac{\chi_b \alpha_\tau}{H_o^2} \frac{(n_{1,i+1} - 2n_{1,i} + n_{1,i-1})}{\Delta h^2} \\ & \frac{n_{2,i} - \bar{n}_{2,i}}{\Delta \tau} + \gamma \frac{n_{1,i+1} - n_{1,i}}{\Delta h} + \beta \alpha_\tau \left(n_{2,i} - \frac{a_1 N_{2,o}}{a_2 - b N_{2,o}} \right) = \frac{\chi_b \alpha_\tau}{H_o^2} \frac{(n_{2,i+1} - 2n_{2,i} + n_{2,i-1})}{\Delta h^2} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{P_{1,c,i} - \bar{P}_{1,c,i}}{\Delta \tau} = \frac{P_{1,1} - \bar{P}_{1,1}}{\Delta \tau} + \frac{G_1}{\mu r} \left[\frac{P_{2,c,i+1} - 2P_{2,c,i}}{\Delta h^2} \right] \\ & \frac{P_{2,c,i} - \bar{P}_{2,c,i}}{\Delta \tau} = \frac{P_{1,2} - \bar{P}_{1,2}}{\Delta \tau} + \frac{G_1}{\mu r} \left[\frac{P_{1,c,i+1} - 2P_{1,c,i}}{\Delta h^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_{1,i} - \bar{h}_{1,c}}{\Delta \tau} &= G_1 \frac{P_{1,c,i} - P_{1,c,i-1}}{\Delta h} \\ \frac{h_{2,i} - \bar{h}_{2,c}}{\Delta \tau} &= G_2 \frac{P_{2,c,i} - P_{2,c,i-1}}{\Delta h} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

бунда

$$\theta_{3,1} = \int_0^1 \frac{y_i (1 - \delta_{1,i})}{2 - \delta_{1,i}} dx, \quad \theta_{3,2} = \int_0^1 \frac{Z_i (1 - \delta_{2,i})}{2 - \delta_{2,i}} dx, \quad W_{1,i} = W_{1,i}^{(s)}, W_{2,i} = W_{2,i}^{(s)}.$$

(27)-(28) тенгламалар системасидан куйидагига эга бўламиз.

$$\left. \begin{aligned} a_i W_{1,i+1} - b_i W_{1,i} + c_i W_{1,i-1} - d_i W_{2,i} + e_i W_{2,i-1} &= -f_i \\ a'_i W_{2,i+1} - b'_i W_{1,i} + c'_i W_{1,i-1} - d'_i W_{2,i} + e'_i W_{2,i-1} &= -f'_i \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

(34) системанинг ечими куйидаги кўринишда аниқланади

$$\left. \begin{aligned} W_{1,i} &= A_i W_{1,i+1} + B_i W_{2,i+1} + C_i \\ W_{2,i} &= A'_i W_{2,i+1} + B'_i W_{1,i+1} + C'_i \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

(35) тизимга киритилган коэффицентлар мос келадиган рекурсив муносабатлардан аниқланади. Такрорлаш жараёни куйидаги шарт бажарилмагунча давом этади:

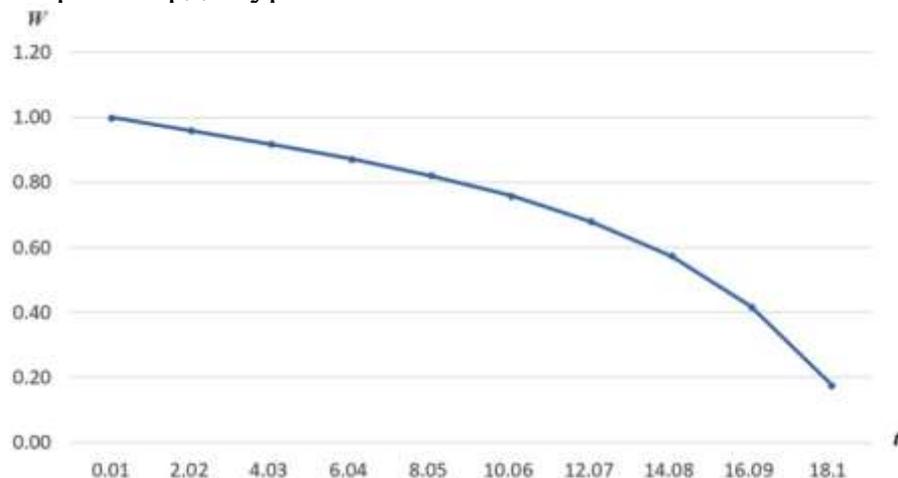
$$\frac{|U_{j,i}^{(s)} - U_{j,i}^{(s-1)}|}{|U_{j,i}^{(s)}|} < \varepsilon, \quad |V_{j,i}^{(s)} - V_{j,i}^{(s-1)}| < \varepsilon, \quad \varepsilon > 0,$$

бунда $U_{j,i}^{(s)}$, $V_{j,i}^{(s)}$ и $U_{j,i}^{(s-1)}$, $V_{j,i}^{(s-1)}$ - функция қийматлари $U(x, \tau)$, $V(x, \tau)$ олдинги вақт катлами бўйича ҳисобланган:

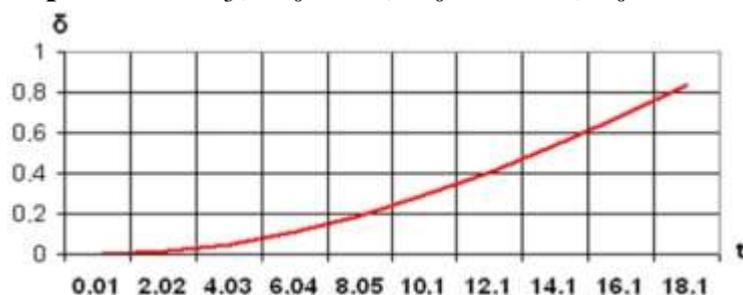
$$U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}.$$

Номаълум ўзгарувчиларни $P_{1,c}$, $P_{2,c}$, h_1 , h_2 ҳисоблаш учун худди шундай тарзда чекли айирмали схемасини қўллаш. Ишлаб чиқилган алгоритм ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун дастурий восита сифатида амалга оширилди.

Киритилган маълумотларнинг турли қийматлари учун сонли ҳисоблашлар ўтказилди. Амалга оширилган ҳисоблаш тажрибаларининг баъзи натижалари 2-5-расмларда кўрсатилган.



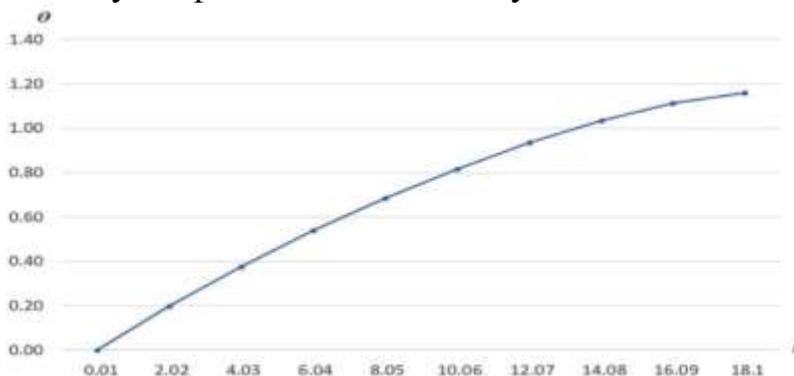
2-расм. Вақт ўтиши билан суюқ эритмаларнинг филтрлаш тезлигининг ўзгариши $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$; $\theta_0 = 0.00001$.



3-расм. Филтр ичидаги гел зарраларининг чўкиш тезлигининг ўзгариши $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$; $\theta_0 = 0.00001$.

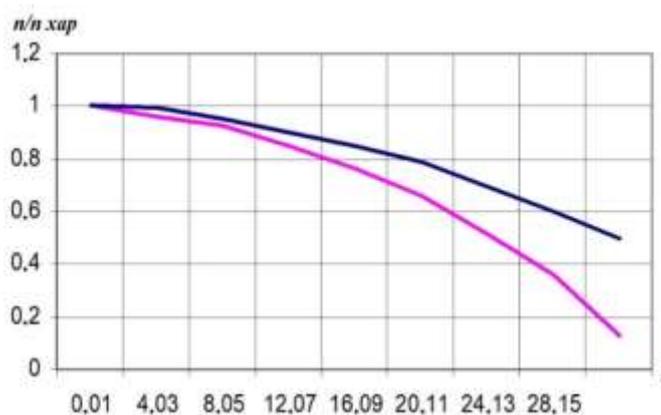
Олинган ҳисоблаш натижаларини таҳлил қилиш филтр қисмининг қалинлигининг пасайиши туфайли суюқликнинг ўтиш тезлиги ошишини ва вақтнинг дастлабки дақиқаларида суюқлик етказиб бериш тезлигининг ошиши филтрлаш жараёнининг тезлашишига ва филтрни алмаштиришнинг пасайишига олиб келишини аниқлашга имкон берди вақт. Аксинча, дастлабки суюқлик оқимининг пасайиши суюқ эритмаларни филтрлаш технологик жараёнининг асосий кўрсаткичларининг ўзгаришига, хусусан, филтр бўлими юзасида эритма концентрациясининг ўзгаришига, суюқликнинг чиқиш концентрацияси, филтрнинг тешикларида гел зарралари колматацияси ва чўкиш тезлигининг ўзгаришига олиб келади. Бундан ташқари, $t \geq 40,21$ филтрлаш вақти билан филтрлаш даражаси нолга яқинлашади.

Шунингдек, ионлашган эритмаларни ион алмашиниш филтрлашнинг асосий параметрларидан бири бародиффузия коэффиценти эканлиги аниқланган. Бародиффузия коэффицентининг ошиши билан эритма ва филтр тўсинидаги алмашинувчи ионларнинг ўзгариш тезлиги ошади ва бу ўз навбатида филтр колоннасининг ишлаш вақтини қисқаришига ва бирлик колоннаси ичидаги босимнинг ошишига олиб келади. Филтр бўлими ионлар билан тўлиқ тўйинган эмаслигига қарамай, филтр тешикларини гел зарралари билан колматация қилиш билан масса узатиш муаммосини ҳал қилишда филтр блокнинг устунида босим ортиши филтрни муддатдан олдин алмаштиришга ва критик ҳолатларга олиб келади. Бу таъсир гел зарралари ионит филтрини коллация қилиш орқали ионит элементларини "ажратиб олиш" ва шу билан суюқ фаза билан алоқани узиш билан изоҳланади.



4. Расм. Вақт ўтиши билан филтр агрегатлари устунидаги

аралашманинг концентрациясининг ўзгариши $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$;
 $\theta_0 = 0.00001$.



5-расм. Бародиффузия коэффициентининг қуйидаги қийматларида эритмадаги алмашинадиган ионлар концентрациясининг ўзгариши:

$$1 - \chi_b = 3 \cdot 10^{-6}; \quad 2 - \chi_b = 3 \cdot 10^{-5}.$$

Фарғона Сунъий тола тайёрлаш заводидан олинган тажриба натижалари билан агрегат устунидаги босимнинг ҳисобланган қийматларини солиштириш 5-6% дан ошмади, бу эса ишлаб чиқилган математик моделнинг адекватлигини тасдиқлайди. Бинобарин, ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминотдан фильтр birlikларининг иш режимларини танлаш ва уларнинг алоҳида элементларини яхшилаш учун фойдаланиш мумкин.

Диссертациянинг тўртинчи «Суюқ аралашмалар ва ионланган эритмаларни филтрлаш муаммоси бўйича ҳисоблаш тажрибаларини автоматлаштириш учун дастурий мажмуа» бобида ишлаб чиқилган «ION-filtr» дастурий таъминотининг функционал характеристикалари ва хусусиятлари муҳокама қилинади.

Дастурий таъминот ва воситалар мажмуаси (6. расм) маълумотларни тайёрлаш ва киритиш, суюқ эритмаларни филтрлаш усулларига қараб масаланинг ечимини танлаш учун бошқарув дастуридан иборат, шу жумладан: механик ва ион алмашинадиган филтрлаш, колматация ва соффузияни ҳисобга олган ҳолда филтрлаш, чўкинди қатламнинг шаклланиши ва унинг хусусиятлари, шунингдек филтрлаш агрегати параметрларини ҳисобга олинади. Дастурий таъминот тўплами ҳисоб-китоблар натижаларини жадвал ва диаграмма шаклида талқин қилиш имкониятини беради.

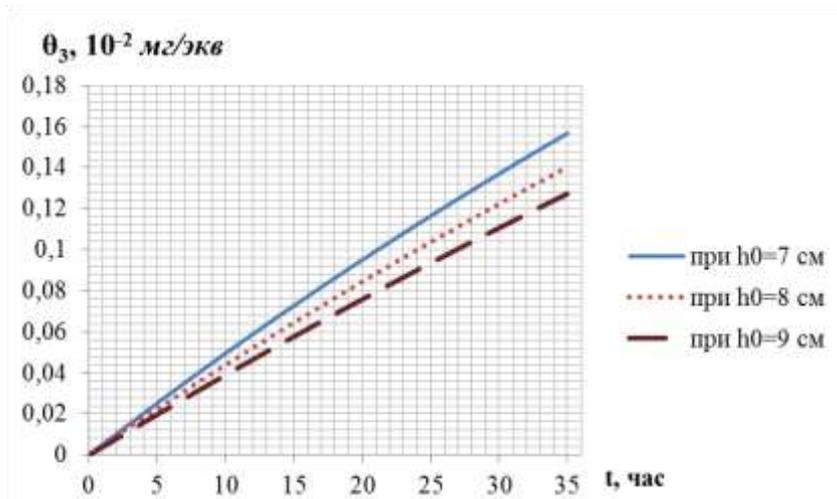


мумкин.

Бошқа дастурий модулла билан ўзаро алоқалар шунга ўхшаш тарзда ташкил этилган. Масалан, суюқ ионланган эритмаларни тозалашнинг технологик жараёни бир неча усул билан амалга оширилганлиги сабабли, жиҳознинг иш режимини танлаш учун тегишли ишчи интерфейسدан фойдаланиш керак.

Кирилган барча сонли маълумотлар СИ бирликлар тизимида мос келиши керак. Дискрет координаталар ва функцияларни қуриш учун зарур бўлган сонли маълумотларни киритиш «тўр ва вақт» бўлимида амалга оширилади. Интеграция қадамлари ва сони вақт бўйича, фильтр баландлиги бўйича белгиланади. График тасвирларнинг сифатини ошириш учун фазовий координата бўйича юздан ортиқ қадамларни (нуқталарни) киритиш тавсия этилади. Дастурнинг асосий менюсига ўтиш ушбу форманинг «чиқиш» тугмаси ёрдамида амалга оширилади.

ION Filtr дастурий таъминот пакетининг натижалари намунаси 8 – расмда келтирилган.



8-расм. Турли фильтр қалинлигида вақт функцияси сифатида чикиш концентрациясининг ўзгариши.

Дастурий таъминот тўплами операцион тизим Windows 7 ва ундан кейинги версиялари муҳитида ишлаш учун мўлжалланган, шунингдек, Maple муҳитида ҳисоб-китобларни амалга ошириш учун бирлаштирилиши мумкин.

ION-Filter дастурий мажмуаси қатлам қалинлигига, ажратилаётган муҳитнинг физик-механик хоссаларига, шунингдек филтрлаш блокининг иш параметрларига қараб концентрация майдонларининг хусусиятларини ва масса тезлигини ўрганиш учун ишлатилиши мумкин. Шунингдек, дастурий таъминот тўплами ўрганилаётган жараёнларнинг математик моделининг параметрларини аниқлаш ва Навье-Стокса тенгламалари доирасида суюқликларнинг икки ўлчовли оқимини ўрганиш жараёнида фойдали бўлиши мумкин.

ХУЛОСА

«Сууюк эритмаларнинг филътрлаш технологик жараёнини тадқиқ қилиш учун моделлар ва ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Сууюк ва ионланган эритмаларни филътрлашнинг ностационар технологик жараёнларини ўрганиш учун математик моделлаштириш усулларини ривожлантириш билан боғлиқ илмий ишлар батафсил таҳлил қилинди.

2. Сууюк ва ионланган эритмаларни механик ва ионли филътрлаш технологик жараёнини тадқиқ қилиш учун математик моделни такомиллаштирилди.

3. Кольматация ва суффозия жараёнларини эътиборга олинган ҳолда ғовак муҳитда суспензияларни филътрлашнинг ностационар технологик жараёнларининг асосий кўрсаткичларини мониторинг ва башоратлаш қилиш учун математик модел ишлаб чиқилди.

4. Сууюк эритмаларни филътрлашда филътр устида чўкиндилар қатлами ҳосил бўлиш жараёни учун математик моделни такомиллаштирилди.

5. Кольматация ва суффозия жараёнлари эътиборга олинган ҳолда ғовак муҳитда суспензияларни филътрлашнинг ностационар технологик жараёнларини таҳлил қилиш ва башоратлаш масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқилди.

6. Кольматация, суффозия ва чўкиндилар қатлами ҳосил бўлиш жараёнлари эътиборга олинган ҳолда сууюк ва ионланган эритмаларни механик ва ионли филътрлаш масалаларини ечиш дастурий воситаларини ишлаб чиқилди.

7. Таклиф этилган математик аппарат сууюк ва ионланган эритмаларни филътрлашнинг ностационар технологик жараёнларини комплекс ўрганиш, концентрация майдонлари ва масса тезлиги ўзгаришларини ҳамда ажратиладиган муҳитнинг физик-механик хоссалари, филътр бўлимининг қалинлиги ва ғоваклиги, филътр агрегатининг ишлаш кўрсаткичларига қараб филътр устун ичидаги босимни баҳолаш ва башорат қилишнинг амалий масалаларини ечиш имконини берди.

8. Ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминот «INTEGRA DD» МЧЖ, Самарқанд вилояти «Сув таъминот» МЧЖ ва «Каттақўрғон ёғ-мой» АЖларга амалий тадбиқ этилган. Бунинг натижасида сув ва ёғни тозалаш агрегати филътрларининг ишлаш муддатини 12%га ошириш, муҳандислик ҳисоб-китоблари учун вақт ва меҳнат харажатларини 6-10% га ва адсорбсия харажатларни 8%га камайтирилиши таъминланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

САИДОВ УТКИРЖОН МАЛЛАЕВИЧ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.4.PhD/T1576.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель:	Равшанов Нормаммад доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Джуманов Жамолжон Худойкулович доктор технических наук, профессор Болтибаев Шухратжон Комилжанович доктор философии в области технических наук
Ведущая организация:	Термезский государственный университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 г. в __ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский р-н, Буз-2, 17А. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер №____). (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский р-н, Буз-2, 17А. Тел.: (99871) 263-41-98).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2022 года.
(протокол рассылки №__ от «__» _____ 2022 г.).

Н.С. Маматов

Председатель научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, с.н.с

Ф.М. Нуралиев

Ученый секретарь научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, доцент

Ф.М. Нуралиев

Председатель научного семинара
при научном совете
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется изучению нестационарных технологических процессов (НТП) фильтрования и очистки жидких смесей и ионизированных растворов, которые широко применяются на объектах производства (заводы химической промышленности и смежных отраслей). Нестационарные технологические процессы фильтрования жидкостей от примесей, технологических отходов и тяжёлых металлов – это один из основных этапов в производстве масложировых, фармацевтических, машиностроительных, пищевых и других видов продуктов. Рациональная организация управления данным технологическим процессом позволяет существенно уменьшить эксплуатационные расходы и улучшить качество выходного продукта. Работоспособность же фильтровальных агрегатов определяется физико-механическим и химическими свойствам фильтрационных материалов, а также режимами работы фильтров с помощью которых осуществляется отделение частиц твердой фазы, гель-частиц, ионов и других сопутствующих элементов от жидкой фазы растворов.

Во всём мире проводятся целевые исследования в области разработки математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для анализа и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов с учетом воздействия различных параметров с удельными весами и откликами. Следует отметить, что успешное решение задач прогнозирования и управления рассматриваемого нестационарного технологического процесса, не всегда достижимо применением экспериментальных методов. Поэтому, наиболее перспективный путь дальнейших исследований нестационарных технологических процессов фильтрования жидких растворов лежит в плоскости применения возможностей и средств математического моделирования и вычислительного эксперимента. Это научное направление с теоретической и экспериментальной точек зрения все еще недостаточно проработано. В этой связи, вопросы развития моделей, алгоритмов и программных средств для решения задач анализа, прогнозирования и поддержки принятия решений по управлению нестационарных технологических процессов фильтрования жидких растворов являются крайне актуальными в среде мирового научного и профессионального сообщества.

В нашей республике за последние годы предпринимаются широкомасштабные меры по развитию сельскохозяйственного и перерабатывающего секторов, в том числе внедрение современных информационных технологий, разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами. Так, в Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах обозначены задачи, в частности: «... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления, ... модернизация и интенсивное развитие сельского хозяйства дальнейшая модернизация и

диверсификация промышленности путем перевода ее на качественно новый уровень, направленные на опережающее развитие высокотехнологичных обрабатывающих отраслей, ...»¹. Успешное выполнение отмеченных задач во многом определяет необходимость дальнейшего развития математического и программного обеспечения для анализа и прогнозирования технологических процессов фильтрования жидких ионизированных растворов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан №УП-5349 от 19 февраля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию сферы информационных технологий и коммуникаций», №УП-5853 от 23 октября 2019 года «Об утверждении Стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020-2030 годы» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. За последние годы по нестационарному технологическому процессу фильтрования и сепарирования жидких ионизированных растворов проведены научные исследования и получены значительные теоретические и практические результаты. Они рассмотрены в работах зарубежных ученых, как А. Safonyk, V. Gitisa, J. Wang, J. Zhang, Yu. Zhihui, B. Remy, J.W. Dufty, D. Kocaefe, C. Andre, В.В. Белобородов, Ю.М. Шехтман, И.И. Жужиков, И.М. Федоткин, Р.И. Нигматулин, В.П. Ольшанский, Ф.М. Харченко, В.П. Шацкий и др.

В Узбекистане Ф.Б. Абуталиев, Н.Р. Юсупбеков, Н.У. Ризаев, Н.Равшанов, И.К.Хужаев, Б.Хужаёров, Ж.Махмудов, Д.Ф.Файзуллаев, Х.Х.Атаулаев, О.У.Умаров, М.Я.Рахимов, О.Ким, З.М.Маликов и Б.Ю.Палванов внесли большой вклад разработку математических моделей и численных алгоритмов технологического процесса фильтрования и очистки жидких растворов.

Благодаря усилиям отмеченных, а также многих других зарубежных и отечественных ученых, к настоящему времени, уже получены значительные результаты теоретического и прикладного характера, позволяющие комплексно изучать нестационарные технологические процессы фильтрования жидких ионизированных растворов, протекающие в ходе переработки пищевых, масложировых, фармацевтических и агропромышленных продуктов. Однако, многие вопросы разработки и усовершенствования математических моделей и вычислительных алгоритмов, учитывающих такие существенные факторы, как коагуляция и суффозия

¹Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

пористой среды фильтровального материала, до сих пор недостаточно изучены.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта в рамках проектов: ВА-ОТ-А3-21 «Разработка и создание статического центробежного классификатора» (2017-2018); БВ-Атех-2018-9 «Разработка моделей, алгоритмов распределенных вычислений и программных средств для решения задач защиты атмосферы и водных ресурсов от техногенных факторов» (2018-2020).

Целью исследования является разработка и усовершенствование математических моделей, численных алгоритмов и программных средств для исследования, анализа и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов.

Задачи исследования:

проведение анализа научных работ, связанных с развитием методов математического моделирования для исследования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов;

усовершенствование математической модели для исследования технологического процесса механической и ионной фильтрации жидких и ионизированных растворов;

разработка математической модели для мониторинга и прогнозирования основных показателей нестационарных технологических процессов фильтрации суспензий в пористой среде с учетом коагуляции и суффозии;

усовершенствование математической модели процесса образования слоя осадка на фильтре при фильтрации жидких растворов;

разработка эффективных вычислительных алгоритмов для решения задач анализа и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрации суспензий в пористой среде с учетом коагуляции, суффозии и образования слоя осадка жидких и ионизированных растворов;

разработка программных средств для решения задач механической и ионной фильтрации жидких и ионизированных растворов в пористой среде с учетом коагуляции, суффозии и образования слоя осадка.

Объектом исследования являются сложные нестационарные технологические процессы фильтрования жидких и ионизированных растворов.

Предметом исследования являются математические модели, вычислительные алгоритмы и программные комплексы для исследования и анализа и прогнозирования технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов.

Методы исследования. При исследованиях применялись методы математической физики, математического моделирования и вычислительного

эксперимента, численные методы решения дифференциальных уравнений, а также технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель технологического процесса механического и ионообменного фильтрования жидких растворов через пористую среду;

разработана математическая модель фильтрации мало-концентрированных суспензий в пористой среде с учетом коагуляционного и суффозионного процессов;

усовершенствована математическая модель нестационарного технологического процесса фильтрования суспензий с учетом образования слоя осадка на поверхности фильтровальной перегородки;

разработаны эффективные вычислительные алгоритмы решения задач механической и ионной фильтрации суспензий и ионизированных растворов с учетом процессов коагуляции, суффозии и формирования осадочного слоя.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны математические модели и вычислительные алгоритмы для численного исследования нестационарного технологического процесса фильтрования суспензий и ионизированных растворов;

с использованием разработанного математического аппарата и программного средства определены основные показатели и параметры фильтровальных агрегатов, применяемых в технологии переработки жидких и ионизированных растворов;

разработаны практические рекомендации по выбору оптимальных режимов функционирования фильтровальных агрегатов и определению методов фильтрования растворов.

Достоверность результатов исследования обосновывается тем, что уравнения движения смеси и изменения концентрации смесей в фильтрующих агрегатах и их краевые условия сформированы в строгом соответствии законам сохранения массы, вещества и импульса, а также сопоставлением результатов численных расчетов с лабораторными экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов проведенных исследований заключается в развитии методологии математического моделирования и вычислительного эксперимента для анализа функционирования и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности улучшения определения способов фильтрования смесей и растворов, а также в разработке рекомендаций для усовершенствования оборудования и машин, используемых для указанных выше процессов.

Внедрение результатов исследования. На основе применения математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного средства для анализа и прогнозирования технологического процесса

фильтрации суспензий и ионизированных растворов, а также определения основных показателей фильтровальных агрегатов:

математическая модель технологического процесса механической и ионообменной фильтрации жидких растворов через пористую среду внедрена в ООО «INTEGRA DD» математическое и программное обеспечение для исследования технологических процессов очистки жидких растворов при разработке лекарственных капсул (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций №33-8/1382 от 24 февраля 2021 года). В результате обеспечена возможность увеличить время работы фильтров очистных установок на 8-12% и уменьшить адсорбционный расход на 5-8%;

математическая модель технологического процесса механической и ионообменной фильтрации жидких растворов через пористую среду внедрена в ООО «Сув таъминот» Самаркандской области математическое и программное обеспечение для определения и контроля изменений основных параметров фильтровальных установок для очистки воды в открытых водоёмах (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций №33-8/1382 от 24 февраля 2021 года). В результате обеспечена возможность увеличить срок службы фильтров на 7-10%, а также сократить время и трудозатраты на проведение инженерных расчетов на 6-10%;

математическая модель технологического процесса механической и ионообменной фильтрации жидких растворов через пористую среду внедрена в АК «Каттакўрғон Ёғ-мой» математическое обеспечение и программные средства для исследования технологических процессов рафинации хлопкового масла внедрены (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций №33-8/1382 от 24 февраля 2021 года). В результате обеспечена возможность увеличить время работы фильтров для очистки хлопкового масла на 7-10% и снизить расходы на адсорбцию на 2-4%.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты данного диссертационного исследования были обсуждены на 8 международных и 5 республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, из которых 15 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 9 в зарубежных и 6 в республиканских журналах, а также получены 3 свидетельства об официальной регистрации программных продуктов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 108 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность и востребованность темы

диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, указаны объект и предмет исследования, определено соответствие темы исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и структура диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ состояния проблем математического моделирования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов»** приведен обзор научных работ, посвященных исследованию нестационарного технологического процесса фильтрования жидких и ионизированных растворов, опубликованных за последние десятилетия.

В частности, обсуждены современные методы моделирования процессов механической и ионной фильтрации многокомпонентных суспензий и ионизированных растворов через пористую среду при влиянии различных внутренних и внешних факторов. Рассмотрены общие характеристики НТП фильтрования жидких и ионизированных растворов и принципы работы фильтровальных агрегатов, используемых в различных отраслях промышленности. Отмечено, что в зависимости от физических и механических свойств компонентов смесей, а также от объемов обрабатываемого сырья и жидких растворов, применяются разнообразные способы и устройства фильтрования. Ввиду того, что многократные натурные эксперименты, требуют солидных капиталовложений и не всегда осуществимы, очевидна целесообразность широкого применения методов математического моделирования и современных информационных технологий.

На основании проведенного анализа научных работ обоснована необходимость разработки новых и усовершенствования существующих ММ, вычислительных алгоритмов и программных средств для решения задач анализа и прогнозирования НТП фильтрования жидких и ионизированных растворов, а также определения основных показателей фильтровальных агрегатов с целью поддержки принятия решений выбору оптимальных режимов их функционирования.

Во второй главе диссертации **«Разработка и усовершенствование математических моделей нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов»** исследуется процесс ионообменного фильтрования жидкостей через пористую среду. При разработке моделей НТП часто используется предположение о том, что в процессе фильтрования гель-частицы оседают в порах равномерно по всей толщине фильтровальной перегородки. Однако, как показывают теоретические исследования и экспериментальные данные, степень коагуляции гель-частиц на различных глубинах фильтра неодинаковая. Поскольку ионообменный процесс происходит по всей толщине ионита, то

решение задач с учетом степени кольтматации на различных глубинах ионообменного фильтра представляет собой особый интерес.

Для вывода ММ процесса фильтрования жидкости через пористую среду использованы уравнения двухфазных сред. Полученная математическая модель описывается системами уравнений в частных производных в безразмерном виде:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + ReW \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{(1-\theta_3)} = \frac{F}{H_0^2} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{H_0 F}{Hk_0(1-\theta_3)} \frac{W}{(1-\delta)^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Re \frac{\partial \theta W}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} = \frac{k_1(k_2 + \theta_3)}{k_3 + k_4 \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \tau}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \lambda_1(\theta - \gamma \delta); \quad (4)$$

$$\frac{\partial nm}{\partial \tau} + Re \frac{\partial nW}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial \tau} = a_0 \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \beta \alpha_\tau \left(n - \frac{\alpha_1 N}{\alpha_2 - bN} \right); \quad (6)$$

$$\begin{cases} W = 1, \theta_3 = 0, \theta = e^{-b_0 x}, \delta = 0, (\tau = 0); \\ W = 1, \theta = 1, (x = 0); \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \varphi, (x = 1); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} n(x, 0) = 0, N(x, 0) = 1; \\ n(x, \tau) = 0, n(1, \tau) = \frac{n_0}{N_0} = n^0. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь и далее по тексту приняты следующие обозначения: V – объем фильтрата; W – скорость фильтрования; θ – объемная концентрация взвеси в движущей смеси; θ_3 – концентрация частиц, протекающих через фильтровальную перегородку; δ – концентрация взвеси, оседающей в порах фильтра; α – концентрация частиц, находящихся во взвешенном состоянии; F – площадь фильтра; ρ и μ – плотность и вязкость суспензии; P – давление в колонке агрегата; P_0 – начальное давление в колонке; P_c – давление в слое осадка; H – высота фильтровальной колонки; H_0 – толщина фильтровальной перегородки; h – толщина образовавшегося слоя осадка на поверхности фильтра; m, k – коэффициенты пористости и проницаемости ионита; m_I – начальная пористость; m_0 – пористость осевшей массы в порах фильтра; k_0 – коэффициент проницаемости фильтра до начала его работы; n и N – неравновесные концентрации обменивающихся ионов в растворе в единице длины сорбционной колонки; N_0 – обменная емкость поглощения сорбента; n_1 и n_2 – неравновесные концентрации обменивающихся ионов в растворе в

единице длины сорбционной колонны, соответствующие равновесию с концентрациями n и N ; n_0 – исходная концентрации в растворе вводимого в колонну иона; n' – концентрация ионов в растворе, находящаяся в равновесии с концентрацией N ; β – эффективная константа обменивающихся ионов; χ – коэффициент продольной диффузии; χ_b – коэффициент бародиффузии; a и b – постоянные изотермы; λ – кинетический коэффициент; γ – коэффициент дисперсии; m_0, m_1 – начальная пористость и пористость осевшей массы; ω_1, ω_2 – коэффициенты, характеризующие интенсивность суффозии и кольматации пор; $|\nabla p|$ – модуль градиента давления; τ – время; $Re = \frac{\rho F W_0}{\mu H_0}$ – число

Рейнольдса; $Eu = \frac{\rho W^2}{P_0 m}$ – число Эйлера; $k_1 = m_1 - m_0$; $k_2 = \frac{1 - m_0}{\theta}$; $k_3 = \frac{m_1}{\theta}$; $k_4 = -k_1$;

$a_1 = \frac{a}{N_0}$; $a_2 = \frac{1}{N_0}$; $\varphi = \varphi_1 \frac{H_0}{W_0}$; $b_0 = \lambda_1 m_1 H_0 \frac{1 - m_0}{W_0}$; $a_0 = \frac{D_L F \rho}{\mu H_0}$; I_0 – функция Бесселя

нулевого порядка; $B = \frac{m_0(1 - m)}{W}$; G – модуль сжимаемости осадка

$G = -(1 + e) \frac{\partial P_4}{\partial e} = (1 + e) \frac{\partial P}{\partial e}$; $P_4 = P_1 - P_2$; P_1, P_2 – значения внешней силы давления на слой осадка и за фильтровальной перегородкой; u – коэффициент наружного отражения осадка.

Используя полученную модель (1)-(8) можно проводить численные расчеты на вычислительную систему (ВС) для исследования ионообменного фильтрования жидкостей через пористую среду, определения основных параметров НТП и их диапазонов изменения.

Другим важным аспектом при исследовании НТП фильтрация жидкостей в пористых средах является учет кольматационного, суффозионного и других сопутствующих процессов. В исследованиях многих авторов задачи фильтрации жидкостей в пористых средах решаются при постоянном значении скорости фильтрации, без учета интенсивности осаждения частиц в порах фильтрующего материала, ионообменного процесса и резких перепадов давления.

Как показывает практика указанные факторы существенным образом влияют на исследуемый процесс прямо воздействуя на фильтрационные свойства пористой среды и срок службы фильтров.

Поэтому, с целью наиболее точного описания НТП фильтрации жидкостей в пористых средах была разработана ММ на основе законов гидродинамики и кинетики процесса, в которой учитываются явления кольматации и суффозии, выражающиеся в изменении скорости фильтрации, образовании осадочного слоя на поверхности фильтра, а также изменении проницаемости пористой среды:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} + W \frac{\partial W}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu H_0 W}{\rho H k_0 (1-\delta)^2}; \\ \frac{\partial m \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial W \theta}{\partial x} + \frac{\partial m \alpha}{\partial \tau} + (1-m_0) \frac{\partial m \delta}{\partial \tau} &= 0; \\ \frac{\partial \delta}{\partial \tau} &= \lambda(\theta - \gamma \delta), \quad \theta = \frac{\alpha}{1-\delta}; \\ \frac{\partial m}{\partial \tau} &= \omega_1(m_0 - m)|\nabla p| - \omega_2 m \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial m n}{\partial \tau} + \frac{\partial W n}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\chi_b}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \\ \frac{\partial N}{\partial \tau} &= \beta(n - n'), \quad N = \frac{n'}{a + b n'}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} W = 1, \theta = e^{-\frac{\lambda m H_0 (1-m_0) x}{W_0}} &= \varphi(x), \delta = 0, m = m_0 \text{ при } t = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial x} &= \frac{H_0^3}{H k_0} \left[P_0 - \frac{W}{(1-\delta)^2} \right], \theta = 1 \text{ при } x = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \frac{m H_0 \lambda (1-m_0)}{W_0} (\gamma_0 \delta - \theta) \text{ при } x = 1, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из постановки задачи (9)-(11), выражаемой системами нелинейных уравнений в частных производных, видно, что получить ее аналитическое решение практически невозможно. Поэтому, для численного интегрирования задачи был разработан численный алгоритм на основе конечно-разностного метода. Для повышения порядка аппроксимации применялась векторно-разностная схема с точностью $O(h^2)$.

Целью проверки адекватности разработанного в главе математического аппарата была проведена серия ВЭ на ВС по определению параметров НТП фильтрации суспензий в пористой среде и диапазонов их изменений. Полученные результаты численных расчетов были сопоставлены с опытными экспериментальными данными Дж. Бейлиса (рис. 1), расхождение с которыми не превышало 5%.

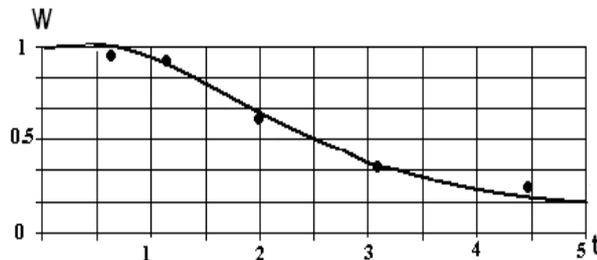


Рис. 1. Сопоставление изменения скорости фильтрации по времени (——— — расчетные данные; ••• — экспериментальные данные).

Также, ВЭ было установлено, что в процессе фильтрации раствора при постоянном значении давления, основная масса гель-частиц оседает на верхнем слое фильтра, вызывая образование слоя осадка.

Увеличение скорости подачи жидкости в колонку фильтра на начальных стадиях НТП фильтрования вызывает рост производительности фильтра, но затем, за счет процесса коагуляции, время переключения фильтровального агрегата сокращается, что вызывает рост гидравлического давления в фильтре.

Кроме того, в отличие от многих исследований других авторов, была установлена роль и значимость коэффициента бародиффузии в рассматриваемом процессе. С ростом значения коэффициента бародиффузии существенно изменяется скорость ионообмена между раствором и фильтровальной перегородкой. Это, в свою очередь, приводит к сокращению времени работы фильтра.

В третьей главе диссертации под названием «**Численное исследование нестационарного технологического процесса фильтрования малокоагулируемых суспензий**» разработаны ММ НТП фильтрования суспензий с учетом образования слоя осадка и численный алгоритм решения поставленной задачи.

Одним из основных показателей, играющих важную роль в технологии очищения жидких растворов является скорость прохода жидкости через фильтровальную перегородку, которая изменяется со временем. Поэтому для разработки ММ, адекватно описывающей НТП, необходимо учесть изменения скорости фильтрования раствора, как по времени, так и по толщине фильтра. Для более адекватного описания НТП также были учтены такие факторы, как образование слоя осадка на поверхности фильтровальной перегородки фильтра, изменение пористости фильтра и осадочного слоя, рост поверхностного давления в колонке агрегата и внутри осадочного слоя. Таким образом ММ НТП фильтрования малокоагулируемых суспензий в безразмерной форме можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \text{Re}W \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{1-\theta_3} \frac{d\theta_3}{d\tau} = -Eu \cdot \text{Re} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{HK_0}{(H_0^2 + h^2)} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{W}{(1-\theta_3)(1-\delta)^2}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{Eu} \left[\frac{m}{\text{Re}(1-\delta)^2} - \frac{d\theta_3}{d\tau} \right]; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\frac{\partial \theta W}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - (1-m_0) \frac{\partial \delta}{\partial \tau} + \frac{\mu_0 \alpha_\tau}{(H_0^2 + h^2)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \lambda(\theta - \gamma\delta); \quad (15)$$

$$\theta - \theta_3 = \frac{\alpha}{1-\delta}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} = \frac{1-\bar{\theta}}{2-\delta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} + \frac{1}{2-\delta} \left[(1-\bar{\theta}) \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial \tau} - \frac{\theta_1 W_0}{m(H_0 + h)(1-\delta_1)} \right] + \theta_3 \left[\frac{\partial \bar{\delta}}{\partial \tau} + \frac{W_0}{m(H_0 + h)(1-\theta_1)} \right] \frac{1}{2-\delta}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = FW; \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial \tau} = \frac{\partial P_1}{\partial \tau} + G \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu r} \frac{\partial P_c}{\partial x} \right]; \quad (19)$$

$$\frac{1}{u} \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial P_c}{\partial x} \Big|_{x=h(\tau)}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = -\frac{W_0 \alpha_\tau}{H_0 m} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{N_0}{nm} + \frac{\partial N}{\partial \tau} + \frac{\chi \alpha_\tau}{H^2 m} \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\alpha_\tau \chi_b}{PH_0} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \frac{\alpha_\tau \beta}{1} \left[\frac{n_0 n}{N_0} - \frac{a}{a - bNN_0} \right]; \quad (22)$$

$$P_c[h(\tau), \tau] = P_1(\tau), \quad \tau > 0 \quad (23)$$

с начальными и краевыми условиями:

$$\begin{cases} \theta = e^{-\lambda H_0 Bx}, \quad \delta = 0, \\ W = 1, \theta_3 = 0, h = 0, \\ n = 1, N = 0, P = \varphi_1, P_c = \varphi_2 \end{cases} \quad \text{при } t = 0; \quad (24)$$

$$\begin{cases} \theta = 1, \quad P = 1, \quad n = \frac{1}{n_0}, \\ W = 1, P_c(0, \tau) = P_2(\tau) \end{cases} \quad \text{при } x = 0; \quad (25)$$

$$\begin{cases} \theta(x, \tau) = \theta_0 e^{-\sigma B H_0} \left[e^{\sigma B H} I_0(2\sqrt{\sigma \gamma H_0 \tau} + \frac{1}{\sigma B H_0 I_0}) \right] (2\sqrt{\tau}) d\tau, \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{a_0 H_0}{W_0}, \frac{\partial n}{\partial x} = 0, P = \phi_3, P_c = \phi_4 \end{cases} \quad \text{при } x = 1. \quad (26)$$

$$m = m_1 + \delta(m_0 - m_1).$$

Если пористость слоя фильтра m переменная величина, т.е. $m = m(x, \tau)$, то можно положить: $\theta_3 = \delta$ при $x = 1$ и тогда $m = m_1 + \delta(m_0 - m_1)$.

Из постановки задачи (12)-(26) видно, что получить ее аналитическое решение затруднительно. Для численного решения используем векторную схему Самарского – Фрязинова высокого порядка точности, а затем полученные системы уравнений аппроксимируем неявной разностной схемой и получим разностный аналог (12)-(26) в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{W_{1,i} - \overline{W}_{1,i}}{\Delta \tau} + W_{1,i}^{(s-1)} \frac{W_{2,i} - W_{2,i-1}}{\Delta h} - \frac{W_i}{1 - \theta_{3,1}} \frac{\theta_{3,1} - \overline{\theta}_{3,1}}{\Delta \tau} = \\ & -Eu \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{W_{1,i+1} - 2W_{1,i} + W_{1,i-1}}{\Delta h^2} - \frac{1}{\text{Re}_1} \frac{W_{1,i}}{(1 - \theta_{3,1})(1 - \delta_{1,i})^2}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \frac{W_{2,i} - \overline{W}_{2,i}}{\Delta \tau} + W_{2,i}^{(s-1)} \frac{W_{1,i+1} - W_{1,i}}{\Delta h} - \frac{W_{2,i}}{1 - \theta_{3,2}} \frac{\partial \theta_{3,2}}{\partial \tau} = \\ & -Eu \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{W_{2,i+1} - 2W_{2,i} + W_{2,i-1}}{\Delta h^2} - \frac{1}{\text{Re}_1} \frac{W_{2,i}}{(1 - \theta_{3,2})(1 - \delta_{2,i})^2}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \frac{y_i - \bar{y}_i}{\Delta \tau} + \frac{W_{1,i}Z_i - W_{2,i-1}Z_{i-1}}{\Delta h} = 0 \\ \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{\Delta \tau} + \frac{W_{2,i+1}y_{i+1} - W_{2,i}y_i}{\Delta h} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \frac{\delta_{1,i} - \bar{\delta}_{1,i}}{\Delta \tau} = \lambda_0 (y_i - \gamma_0 \delta_{1,i}) \\ \frac{\delta_{2,i} - \bar{\delta}_{2,i}}{\Delta \tau} = \lambda_0 (Z_i - \gamma_0 \delta_{2,i}) \end{cases} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_{1,i} - \bar{n}_{1,i}}{\Delta \tau} + \gamma \frac{n_{2,i+1} - n_{2,i}}{\Delta h} + \beta \alpha_\tau \left(n_{1,i} - \frac{a_1 N_{1,o}}{a_2 - b N_{1,o}} \right) &= \frac{\chi_b \alpha_\tau}{H_o^2} \frac{(n_{1,i+1} - 2n_{1,i} + n_{1,i-1})}{\Delta h^2} \\ \frac{n_{2,i} - \bar{n}_{2,i}}{\Delta \tau} + \gamma \frac{n_{i,1} - n_{i+1}}{\Delta h} + \beta \alpha_\tau \left(n_{2,i} - \frac{a_1 N_{2,o}}{a_2 - b N_{2,o}} \right) &= \frac{\chi_b \alpha_\tau}{H_o^2} \frac{n_{2,i+1} - 2n_{2,i} + n_{2,i-1}}{\Delta h^2} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{1,c,i} - \bar{P}_{1,c,i}}{\Delta \tau} &= \frac{P_{1,1} - \bar{P}_{1,1}}{\Delta \tau} + \frac{G_1}{\mu r} \left[\frac{P_{2,c,i+1} - 2P_{2,c,i}}{\Delta h^2} \right] \\ \frac{P_{2,c,i} - \bar{P}_{2,c,i}}{\Delta \tau} &= \frac{P_{1,2} - \bar{P}_{1,2}}{\Delta \tau} + \frac{G_1}{\mu r} \left[\frac{P_{1,c,i+1} - 2P_{1,c,i}}{\Delta h^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_{1,i} - \bar{h}_{1,c}}{\Delta \tau} &= G_1 \frac{P_{1,c,i} - P_{1,c,i-1}}{\Delta h} \\ \frac{h_{2,i} - \bar{h}_{2,c}}{\Delta \tau} &= G_2 \frac{P_{2,c,i} - P_{2,c,i-1}}{\Delta h} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где

$$\theta_{3,1} = \int_0^1 \frac{y_i (1 - \delta_{1,i})}{2 - \delta_{1,i}} dx, \quad \theta_{3,2} = \int_0^1 \frac{Z_i (1 - \delta_{2,i})}{2 - \delta_{2,i}} dx, \quad W_{1,i} = W_{1,i}^{(s)}, \quad W_{2,i} = W_{2,i}^{(s)}.$$

Из системы уравнений (27)-(28) получим

$$\left. \begin{aligned} a_i W_{1,i+1} - b_i W_{1,i} + c_i W_{1,i-1} - d_i W_{2,i} + e_i W_{2,i-1} &= -f_i \\ a'_i W_{2,i+1} - b'_i W_{1,i} + c'_i W_{1,i-1} - d'_i W_{2,i} + e'_i W_{2,i-1} &= -f'_i \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Решение системы (34) ищется в виде

$$\left. \begin{aligned} W_{1,i} &= A_i W_{1,i+1} + B_i W_{2,i+1} + C_i \\ W_{2,i} &= A'_i W_{2,i+1} + B'_i W_{1,i+1} + C'_i \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Коэффициенты, входящие в систему (35), определяются из соответствующих рекурсивных соотношений. Непосредственно сам итерационный процесс продолжается до выполнения условия:

$$\frac{|U_{j,i}^{(s)} - U_{j,i}^{(s-1)}|}{|U_{j,i}^{(s)}|} < \varepsilon, \quad |V_{j,i}^{(s)} - V_{j,i}^{(s-1)}| < \varepsilon, \quad \varepsilon > 0,$$

где $U_{j,i}^{(s)}$, $V_{j,i}^{(s)}$ и $U_{j,i}^{(s-1)}$, $V_{j,i}^{(s-1)}$ - значения функции $U(x, \tau)$, $V(x, \tau)$ вычислены на предыдущем временном слое:

$$U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}.$$

Применяя аналогичным способом конечно-разностную схему для вычисления искоемых переменных $P_{1,c}$, $P_{2,c}$, h_1 , h_2 . Разработанный алгоритм был реализован в виде программного средства для проведения вычислительных экспериментов.

Численные расчеты проводились при различных значения входных данных. Часть результатов проведенных вычислительных экспериментов представлена на рис. 2-5.

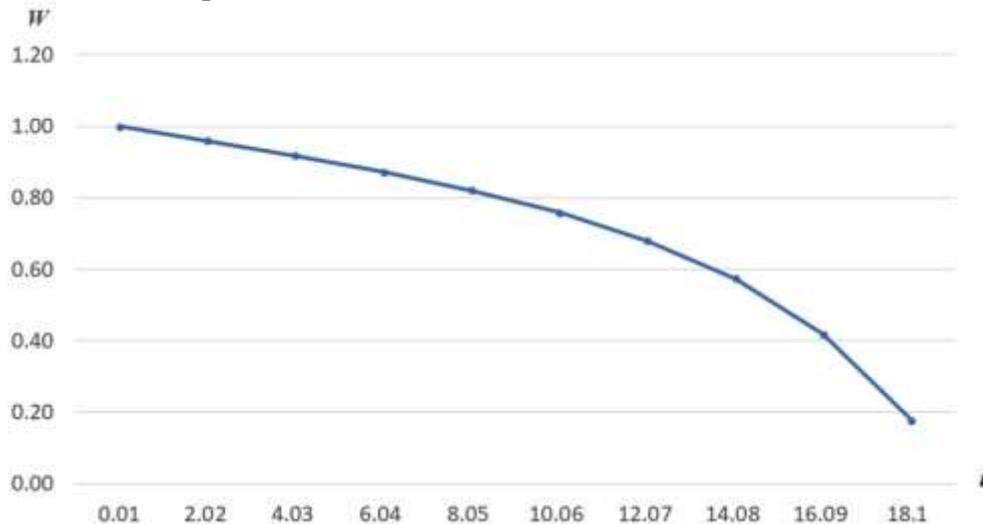


Рис. 2. Изменение скорости фильтрации жидких растворов по времени при $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$; $\theta_0 = 0.00001$.

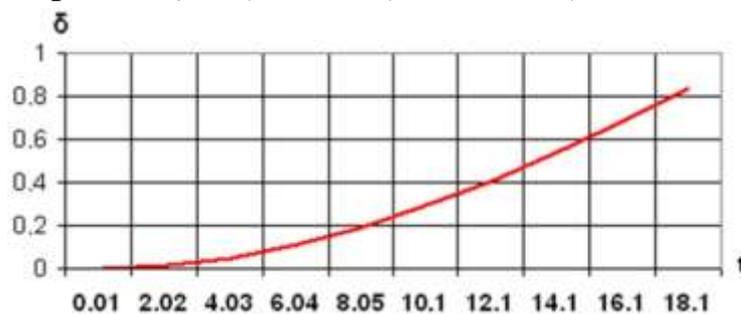


Рис. 3. Изменение скорости осаждения гель-частиц внутри фильтра при $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$; $\theta_0 = 0.00001$.

Анализ полученных результатов расчетов позволил установить, что за счет уменьшения толщины фильтровальной перегородки растет скорость прохода жидкости, а увеличение скорости подачи жидкости в начальных моментах времени приводит к ускорению процесса фильтрования и к сокращению времени переключения фильтра. Напротив, уменьшение начальной скорости подачи жидкости приводит к изменению основных показателей технологического процесса фильтрования жидких растворов, в частности, к изменению концентрации раствора на поверхности фильтровальной перегородки, выходную концентрацию жидкости и скорости осаждения гель-частиц в порах фильтра. Причем при времени фильтрования $t \geq 40,21$ ч скорость фильтрования приближается к нулю.

Также установлено, что одним из основных параметров при ионообменном фильтровании ионизированных растворов является коэффициент бародиффузии. С ростом коэффициента бародиффузии растет скорость изменения обменивающихся ионов в растворе и фильтровальной перегородке, а это в свою очередь приводит к сокращению времени работы фильтровальной колонки и росту давления внутри колонки агрегата. При решении задачи массообмена с коагуляцией пор фильтра гель-частицами, несмотря на то, что фильтровальная перегородка не полностью насыщена ионами, происходит роста давления в колонке фильтровального агрегата до критического и несвоевременное переключения фильтра. Этот эффект объясняется тем, что гель-частицы, коагулируя ионитный фильтр, как бы «изолируют» зерна ионита и тем самым изолируют контакт с жидкой фазой.

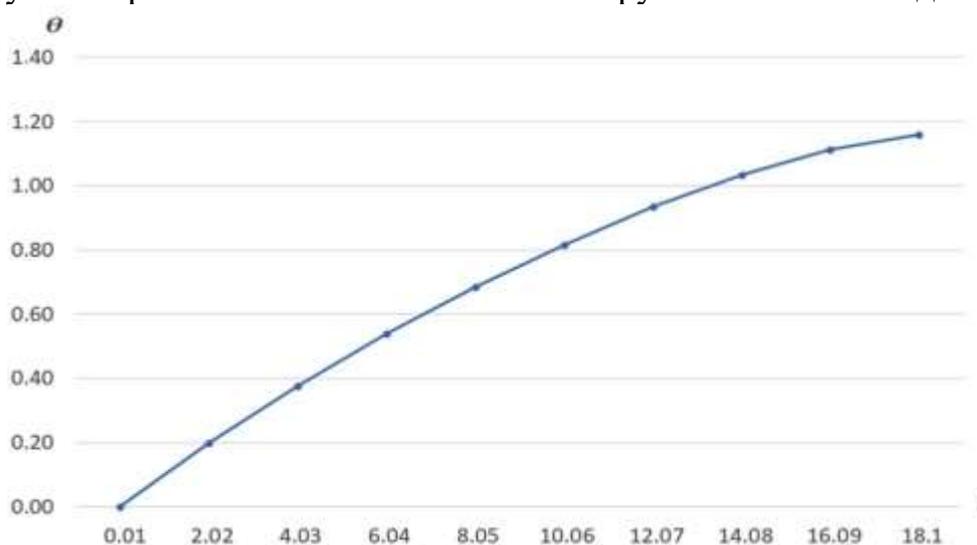


Рис. 4. Изменение концентрации смеси в фильтровальной колонке агрегата по времени при $\alpha = \theta_3$; $H_0 = 0.2$; $W_0 = 0.0025$; $\theta_0 = 0.00001$.

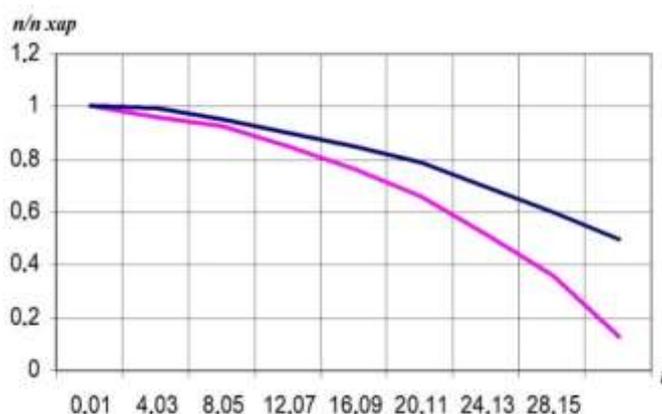


Рис. 5. Изменения концентрации обменивающихся ионов в растворе при следующих значениях коэффициента бародиффузии:

1 – $\chi_b = 3 \cdot 10^{-6}$; 2 – $\chi_b = 3 \cdot 10^{-5}$.

Сопоставление расчетных значений давления в колонке агрегата с экспериментальными данными, полученными из Ферганского завода по приготовлению искусственного волокна не превысило 5-6%, что подтверждает адекватность разработанной ММ. Следовательно,

разработанное математическое и программное обеспечение можно использовать для подбора режимов работы фильтровальных агрегатов и усовершенствования их отдельных элементов.

В четвертой главе диссертации «Комплекс программ для автоматизации проведения вычислительных экспериментов по задаче **фильтрации жидких смесей и ионизированных растворов**» рассматриваются функциональные характеристики и особенности разработанного программного обеспечения «ION-Filter».

Программно-инструментальный комплекс (рис. 6) состоит из блока подготовки и ввода данных, управляющей программы для выбора решения задачи в зависимости от методов фильтрации жидких растворов, в том числе: механическое и ионообменное фильтрование, фильтрование с учётом коагуляции и суффлюзии, образования слоя осадка и его свойств, а также с учетом параметров фильтровального агрегата. Программный комплекс обеспечивает возможность интерпретации результатов расчетов в виде таблиц и диаграмм.



Рис. 6. Главное окно программного комплекса «ION-Filter».

В первом модуле программного комплекса решается задача по определению скорости фильтрации и процесса ионообменного фильтрации жидкости через пористую среду. Во втором модуле обеспечивается возможность решения задачи ионообменного фильтрации с учётом суффлюзионного и коагуляционного процесса. В третьем модуле выполняется решение задачи ионообменного фильтрации суспензий через пористую среду с учетом образования слоя осадка. Например, вид интерфейса программного модуля для расчета процесса фильтрации суспензий при образовании слоя осадка представлен на рис. 7.

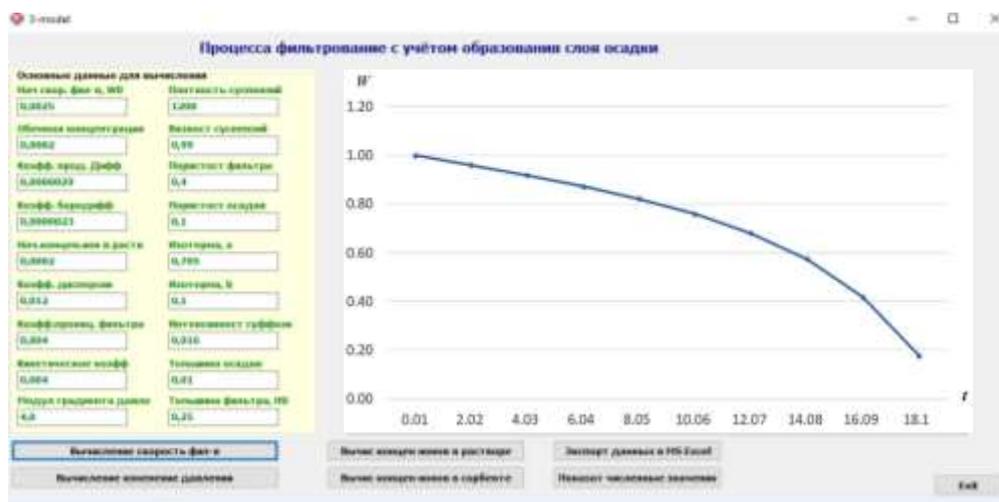


Рис. 7. Интерфейс программного модуля «Процесс фильтрования с учётом образования слоя осадка».

Он состоит из следующих частей: окно ввода показателей рабочего процесса; окно для вывода численных результатов; окно для представления графического материала. В окно ввода показателей рабочего процесса вводятся следующие числовые данные: скорость движущиеся смеси (m/c); толщина фильтра (m); толщина осадка (m); плотность суспензии (kg/m^3); объёмная концентрация (gr/l); вязкость жидкости; начальная концентрация в растворе (gr/l); коэффициенты изотермы; пористость фильтра; коэффициенты продольной диффузии и бародиффузии и другие параметры (рис. 7).

После ввода всех входных параметров с помощью командной кнопки «Вычисление изменение давления» вычисляется изменение давления внутри фильтровального колонны по времени автоматически выводятся числовые значения в виде таблицы и отображаются в графическом виде. Далее с помощью командной кнопки «Концентрация ионов в растворе» и «Концентрация ионов в сорбенте» соответственно можно вычислить значения концентрации десорбции и сорбции по времени и отображать результаты в виде числовых данных графического материала. Кроме этого, предусмотрена возможность экспорта результатов вычислений скорости движения частиц в условиях стесненного движения частиц в приложение MS Excel для обработки числовых данных и подготовки отчетов.

Аналогичным образом организовано взаимодействие с остальными программными модулями. Например, так как технологический процесс очистки жидких ионизированных растворов осуществляется несколькими способами, то для выбора режима работы агрегата необходимо воспользоваться соответствующим рабочим интерфейсом.

Все вводимые числовые данные должны соответствовать системе единиц величин СИ. Введение числовых данных, необходимых для построения дискретных координат и функций, производится в разделе «Сетка и время». Задаются шаг и числа шагов интегрирования по времени, по высоте фильтра. Для улучшения качества графических представлений рекомендуется вводить более сто шагов (точек) по пространственной координате. Переход в главное меню программы осуществляется с помощью кнопки «Выход» данной формы.

Образец результатов работы программного комплекса «ION-Filter» представлен на рис. 8.

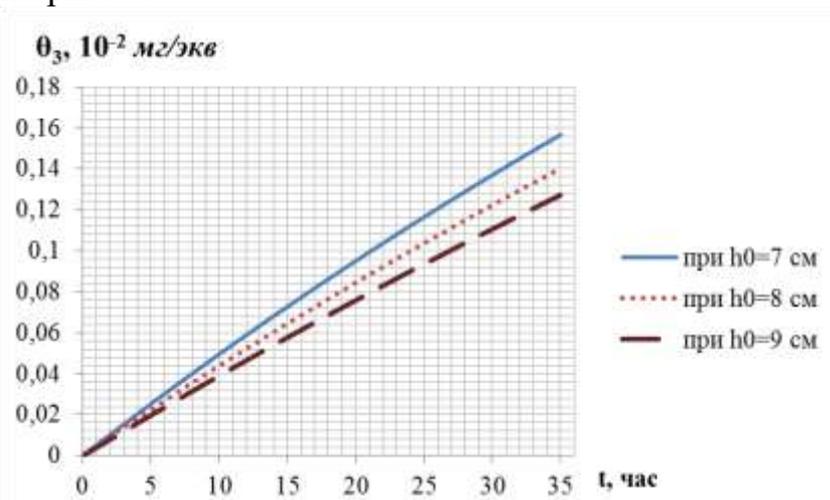


Рис. 8. Изменение выходной концентрации в зависимости от времени при различных значениях толщины фильтра.

Программный комплекс рассчитан для работы в среде операционной системы Windows 7 и более поздних версий, а также может быть интегрирован для выполнения расчетов в среде Maple.

Программный комплекс «ION-Filter» можно использовать при изучении особенностей полей концентрации и скоростей массы в зависимости от толщины слоя, физико-механических свойств разделяемой среды, а также от режимных показателей агрегата фильтрования. Также программный комплекс может быть полезен в процессе идентификации параметров математической модели изучаемых процессов и изучения двухмерного течения жидкостей в рамках уравнений Навье-Стокса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы на тему «Усовершенствование моделей и вычислительных алгоритмов для исследования технологического процесса фильтрования жидких растворов», сводятся к следующему:

1. Проведен подробный анализ научных работ, связанных с развитием методов математического моделирования для исследования и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов.

2. Усовершенствована математическая модель для исследования и прогнозирования технологических процессов механической и ионной фильтрации жидких и ионизированных растворов.

3. Разработана математическая модель для мониторинга и прогнозирования основных показателей нестационарных технологических процессов фильтрации суспензий в пористой среде с учетом явлений коагуляции и суффозии.

4. Усовершенствована математическая модель процесса образования слоя осадка на фильтре при фильтрации жидких растворов.

5. Разработаны эффективные вычислительные алгоритмы решения задач анализа и прогнозирования нестационарных технологических процессов фильтрации суспензий в пористой среде с учетом коагуляции, суффозии и образования осадочного слоя.

6. Разработаны программные продукты, предназначенные для решения задач механической и ионной фильтрации жидких и ионизированных растворов через пористую среду с учетом коагуляции, суффозии и образования слоя осадка.

7. Предложенный математический аппарат позволил провести комплексное исследование нестационарных технологических процессов фильтрования жидких и ионизированных растворов, а также решить практические задачи оценки и прогнозирования изменений полей концентрации и скоростей массы, а также давления внутри фильтровальной колонны в зависимости от физико-механических свойств разделяемой среды, толщины пористости фильтровальной перегородки, режимных показателей фильтровального агрегата.

8. Разработанное математическое и программное обеспечение было внедрено для практического применения на объектах ООО «INTEGRA DD», ООО «Сув таъминот» Самаркандской области и АК «Каттакўрғон Ёғ-мой». В результате обеспечена возможность увеличить срок службы фильтров очистных агрегатов для воды и хлопкового масла до 12%, сократить время и трудозатраты на проведение инженерных расчетов на 6-10% и уменьшить адсорбционные расходы до 8%.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.I3/30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

**RESEARCH INSTITUTE FOR DEVELOPMENT OF DIGITAL
TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

SAIDOV UTKIRJON MALLAEVICH

**IMPROVEMENT OF MODELS AND COMPUTATIONAL ALGORITHMS
FOR RESEARCHING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF LIQUID
FILTRATION SOLUTIONS**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and program complexes

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

Tashkent – 2022

The theme of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.4.PhD/T1576.

The dissertation has been prepared at the Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.tuit.uz and the website of «ZiyoNet» Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser: **Ravshanov Normahmad**
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Djumanov Jamoljon Xudoykulovich**
doctor of technical sciences, professor

Boltibaev Shukhratjon Komiljanovich
doctor of philosophy in technical sciences

Leading organization: **Termez State University**

The defense will take place “___” _____ 2022 at _____ the meeting of Scientific council No.DSc.13/30.12.2021.T.142.01 at Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (is registered under No. _____). (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98).

Abstract of dissertation sent out on “___” _____ 2022 y.
(mailing report No. ___ on “___” _____ 2022 y.).

N.S. Mamatov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

F.M. Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Docent

F.M. Nuraliev
Chairman of the scientific seminar under

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is complex non-stationary technological processes of filtration of liquid and ionized solutions.

The objects of the research work are mathematical models, computational algorithms and software systems for the study and analysis and prediction of technological processes of filtration of liquid and ionized solutions.

The scientific novelty of the research work:

the mathematical model of the technological process of mechanical and ion exchange filtration of liquid solutions through a porous medium has been improved;

a mathematical model of filtration of low-concentrated suspensions in a porous medium has been developed taking into account the colmatation and suffusion processes;

a mathematical model of the non-stationary technological process of filtration of suspensions has been improved, taking into account the formation of a sediment layer on the surface of the filter partition;

effective computational algorithms have been developed for solving problems of mechanical and ion filtration of suspensions and ionized solutions, taking into account the processes of colmatation, suffusion and sedimentary layer formation.

Implementation of obtained results. Based on the use of mathematical models, computational algorithms and software for analyzing and predicting the technological process of filtration of suspensions and ionized solutions, as well as determining the main indicators of filtration units:

mathematical and software for the study of technological processes for the purification of liquid solutions in the development of medicinal capsules were introduced in INTEGRA DD LLC (Reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications No. 33-8/1382 dated February 24, 2021). As a result, it is possible to increase the operating time of filters of treatment plants by 8-12% and reduce the adsorption consumption by 5-8%;

mathematical and software for determining and controlling changes in the main parameters of filtration plants for water purification in open reservoirs have been introduced in LLC "Suvtaminot" of the Samarkand region (Reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications No. 33-8/1382 dated February 24, 2021). As a result, it is possible to increase the service life of filters by 7-10%, as well as reduce the time and labor costs for engineering calculations by 6-10%;

mathematical software and software tools for the study of technological processes of refining cottonseed oil have been introduced in the JSC "Kattakurgon Eg-moi" (Reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications No. 33-8/1382 dated February 24, 2021). As a result, it is possible to increase the operating time of filters for cleaning cottonseed oil by 7-10% and reduce adsorption costs by 2-4%.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 108 pages.

ЭЪЛОНҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Ичасть; I part)

1. N.Ravshanov, U.M. Saidov Modelling technological process of ion-exchange filtration of fluids in porous media// Journal of Physics: Conference Series. – 2018. - Vol. 1015. - P. 1-7. (№3; Scopus; IF=0.7).
2. N.Ravshanov, U.M.Saidov, D.I. Mutin Modelling of the technological process of multiple filtering suspensions with multi-layered filter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 537. - P. 1-7. (№3; Scopus; IF=0.7).
3. B.Palvanov, U.M.Saidov, J.Yusupova Numerical-analytical method for determining the barodiffusion coefficient of technological process of ion-exchange suspension filtration // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020 - Vol. 862. - P. 1-7. (№3; Scopus; IF=0.7)
4. N.Ravshanov, U.M.Saidov, D Karshiev, V E. Bolnokin Mathematical model and numerical algorithm for studying suspension filtration in a porous medium considering the processes of colmatation and suffusion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - 2020 - Vol. 862. - P. 1-6. - (№3; Scopus; IF=0.7).
5. B.Y. Palvanov, U.M. Saidov, M.Sharipov Numerical algorithm for the problem of the technological process of filtering low-concentrated suspensions // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. - Vol. 1889. - P. 1-8. (№3; Scopus; IF=0.7).
6. N. Ravshanov, O. Ja. Kravets, D. Karshiev, U.M.Saidov Numerical modeling approach of wastewater treatment processes // AIP Conference Proceedings . – 2021. – Vol. 2402. – Issue 1. – P. 1-6. (№3; Scopus; IF=0.7).
7. N.Ravshanov, U.M.Saidov, T.Shafiyev Decision of the direct and reverse problem of the technological process of suspension filtering // ISJ Theoretical & Applied Science. – 2018. – № 09(65). – P. 269-279. (№23; SJIF; IF=5.667).
8. N.Ravshanov, U.M.Saidov, U.Orifjonova Mathematical model and numerical algorithm for solving the problem of ion exchange filtering of liquids // Theoretical & Applied Science. – 2017. – Vol. 55. – Issue 11. – Pp. 144-157. (№23; SJIF; IF=5.667).
9. U. Saidov, T. Azamov, Y. Sultonov, Z. Ravshanov Modeling the Process of Filtration of Fluid and Protection of Groundwater from Ionic Pollutants // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2020. – Vol. 9. – №5. – Pp. 8718-8724. (№23; SJIF; IF=6.161).

10. Н.Равшанов, У.М.Саидов Модель для исследования нестационарного технологического процесса ионообменного фильтрования сложносоставных суспензий // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2018. – №1(13). – С. 32-41. (05.00.00; №23).

11. Равшанов Н., Саидов У.М., Шерматова Г.У. Решение прямой и обратной задачи технологического процесса фильтрования суспензии. // Узб. журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2018. – № 2. – С. 3-15. (05.00.00; №5).

12. Н.Равшанов, У.М.Саидов Модельная задача технологического процесса ионообменного фильтрования суспензии и их численно-аналитическое решение // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2018. – №6(18). – С. 102-114. (05.00.00; №23).

13. М.Юсупов, С.Аминов, У.М.Саидов Численное моделирование задачи солепереноса в почвогрунтах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2020. – №1(25). – С. 85-93. (05.00.00; №23).

14. У.М. Саидов Моделирование ионообменной фильтрация жидкости с учетом процесса коагуляции и суффозии // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2021. – №6/1(37). – С. 90-102. (05.00.00; №23).

15. Н.Равшанов, У.М.Саидов Математическая модель и численный алгоритм для исследования технологического процесса фильтрования жидких ионизированных растворов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. — 2022. — №1(38). — С. 44-65. (05.00.00; №23).

Пбўлим (II часть; Part)

16. Ravshanov N., Saidov U.M. Direct and inverse problems to study the process of ion solutions filtering in porous medium. // ИТНТ-2019 : сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф., Самара: Новая техника., 2019., – С. 289-299.

17. Равшанов Н., Саидов У.М. Исследование технологического процесса фильтрования ионизированных растворов при защите подземных вод. // Экологические чтения – 2018: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф., 4-6 июня 2018 ., Омск. – С. 242-246.

18. Равшанов Н., Саидов У.М. Математическая модель - инструмент для исследования процесса многократного ионообменного фильтрования суспензий. // Компьютерный анализ проблем науки и технологии: сб. науч. статей междунар. науч.-теор. конф., 27-28-декабря 2018., Душанбе. –С. 216-221.

19. Равшанов Н., Саидов У.М. Математический инструмент для исследования технологического процесса ионообменного фильтрования жидкостей. // International scientific research 2017: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф., 19 ноября 2017., Москва : Олимп, 2017. – С. 111-116.

20. Равшанов Н., Саидов У.М. Моделирование нестационарного технологического процесса фильтрования химических растворов от тяжелых ионов и гель-частиц. // Информатика: проблемы, методология, технологии сб.

науч. статей междунар. науч.-метод. конф., 8-9 февраля 2018., Воронеж. – С.202-207.

21. Равшанов Н., Саидов Ў.М. Математическая модель для исследования фильтрации суспензий в пористой среде с учетом процесса коагуляции и суффузии. // Инновацион ва замонавий ахборот технологияларини таълим, фан ва бошқарув соҳаларида қўллаш истиқболлари: сб. науч. статей междунар. науч.-метод. конф., 14-15 май 2020., Самарқанд. – С.74-78.

22. Равшанов Н., Саидов У.М., Орифжонова У. Математическая модель для оптимального управления процессом фильтрования смесей через пористую среду. // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: сб. науч. статей междунар. науч.-метод. конф., 27-28 май 2020., Андижон. – С.23-26.

23. Саидов У.М., Махкамов М.К. Численное исследование процесса солепереноса в почвогрунтах. // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: сб. науч. статей междунар. науч.-метод. конф., 27-28 май 2020., Андижон. – С.129-133.

24. Равшанов Н., Саидов У.М. Математическое моделирование технологического процесса ионообменного фильтрования суспензий // Прикладные и фундаментальные проблемы естественных наук: Сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 23-октябрь 2019 г., Ташкент. – С.243-244.

25. Равшанов Н., Саидов Ў.М. Численное исследование процесса многократного ионообменного фильтрования суспензий. // Ахборот-коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратишда инновацион ғоялар: Сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 15-16 май 2020., Самарқанд. –С. 69-72.

26. Саидов У.М. Исследования фильтрации суспензий в пористой среде с учетом процесса коагуляции и суффузии. // Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратишда инновацион ғоялар: Сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 17-18 май 2021., Самарқанд. –С.295-299.

27. Равшанов Н., Саидов У.М. Моделирование технологических процессов фильтрации жидких и ионизированных растворов. // Zamonaviy axborot, kommunikatsiya texnologiyalari va at-ta'lim tatbiqi muammolari: Сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 24-25 mayabr 2021 Самарқанд. –С. 4-10.

28. Саидов У.М.,Кўчқоров Ф.Х. Исследования технологического процесса фильтрования ионизированных растворов от тяжелых ионов и защита подземных вод от источников загрязнений. // Zamonaviy axborot, kommunikatsiya texnologiyalari va at-ta'lim tatbiqi muammolari: Сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 24-25 mayabr 2021 Самарқанд. –С. 73-77.

29. Саидов У.М.,Палванов Б. Программа для ЭВМ «Filter- Separ 3.2» //Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 07933. 06.02.2020 г.

30. Саидов У.М., Палванов Б.Аминов С, Программа для ЭВМ «FilteratsiyaSoil» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 07934. 07.02.2020 г

31. Саидов У.М.,Палванов Б. Программа для ЭВМ «ION-FILTR-1»
//Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство
№ DGU 15426. 24.02.2022г.

Автореферат “Информатика ва энергетика муаммолари” Ўзбекистон
журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз
тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими 84x60 ¹/₁₆ “Times New Roman” гарнитураси рақами босма усулда босилди.
Шартли босма табағи 2,75. Адади 100. Буюртма № 10.

“ЎзР Фанлар академияси Асосий кутубхонаси” босмахонасида чоп этилди.
100170, Тошкент, Зиёлилар кўчаси, 13-уй