

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

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

ШАДМАНОВ ИСТАМ УКТАМОВИЧ

**ҒОВАК ЖИСМЛАРДА ИССИҚЛИК-НАМЛИК КЎЧИШ
МАСАЛАЛАРИНИ ЕЧИШ УЧУН МОДЕЛЬ, ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАРИ ВА ДАСТУРИЙ ТАЪМИНОТЛАРИНИ ИШЛАБ
ЧИҚИШ**

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**

Шадманов Истам Уктамович

Говак жисмларда иссиқлик-намлик қўчиш масалаларини ечиш учун модель,
ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотларини ишлаб чиқиш. 3

Шадманов Истам Уктамович

Разработка моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств
для решения задач тепло-влажнопереноса в пористых телах. 21

Shadmanov Istam Uktamovich

Development of models, computational algorithms and software for solving
problems of heat and moisture transfer in porous bodies. 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 43

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

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

ШАДМАНОВ ИСТАМ УКТАМОВИЧ

**ҒОВАК ЖИСМЛАРДА ИССИҚЛИК-НАМЛИК КЎЧИШ
МАСАЛАЛАРИНИ ЕЧИШ УЧУН МОДЕЛЬ, ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАРИ ВА ДАСТУРИЙ ТАЪМИНОТЛАРИНИ ИШЛАБ
ЧИҚИШ**

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 В2019.2.PhD/Т1118 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.tuit.uz) ва "Ziynet" Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Равшанов Нормаммад техника фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Хужаев Исмаилов Кушаевич техника фанлари доктори, профессор Мухаммадиева Дилдора Кабиловна техника фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Бухоро муҳандислик-технология институти

Диссертация ҳимояси Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 рақамли Илмий кенгашининг 2022 йил «25» март соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, М.Улуғбек тумани, Бўз-2 мавзеси, 17А уй. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz)

Диссертация билан Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (1 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 «12» март да тарқатилди.
(2022 йил «07» март даги 1 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 фанлари 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 пахта хомашёсини сақлаш, қуритиш ва қайта ишлаш технологик жараёнлари самарадорлигини оширишга қаратилган инновацияларга катта эътибор қаратилмоқда. 2020-2021 йй. учун Пахта бўйича халқаро маслаҳат қўмитаси (ICAC, АҚШ) маълумотларига кўра дунёнинг 50 дан ортиқ мамлакатлари пахта хомашёси ишлаб чиқарувчи ҳисобланади, ишлаб чиқариш ҳажмларига бўйича етакчи бешликка қуйидаги давлатлар киради: Ҳиндистон (6026,0 тонна), Хитой (5910,0 тонна), АҚШ (3181 тонна), Бразилия (2342,0 тонн) ва Ўзбекистон (1028 тонна). Шу аснода, юқорида кўрсатилган мамлактларда қишлоқ хўжалик маҳсулотларини сақлаш ва қайта ишлаш, хусусан, пахта хомашёси ғарамларининг юқори намлик, ўз-ўзидан ёниб кетиши, пахта толаси сифати ва физик хусусиятларининг тушиб кетиш шароитида қатор муаммоларини ечиш учун ахборот технологияларини қўллаш ва математик моделлаштириш методологиясини янада ривожлантириш билан боғлиқ илмий тадқиқотлар фаол равишда олиб борилмоқда.

Дунёда ғовак материалларда ички иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларини таҳлил, мониторинг ва башоратлаш муаммоларини ҳал қилиш учун математик моделлаштириш, сонли усуллар ва дастурий таъминот воситаларни ишлаб чиқиш бўйича илмий тадқиқотлар муваффақиятли амалга оширилмоқда. Бундай тадқиқотларнинг натижалари ўрганилаётган жараёнлар ҳақида сифат жиҳатдан янги билимлар; қишлоқ хўжалик маҳсулотларининг ҳарорат ва намлик каби кўрсаткичлар ўзгаришини аниқроқ башоратлар; қишлоқ хўжалик маҳсулотларини сақлаш ва қайта ишлашнинг қулай шароитларини яратиш учун технологик усуллар ва ускуналарни такомиллаштиришни таъминлаш имконини беради.

Ўзбекистон Республикасида сўнгги йилларда қишлоқ хўжалик секторини ривожлантириш, шу қаторда замонавий ахборот технологияларини жорий қилиш, қишлоқ хўжалик маҳсулотлари учун автоматлаштирилган омборхоналар яратиш, технологик жараёнларни бошқаришнинг аппарат-дастурий тизимларини ишлаб чиқиш бўйича кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Жумладан, 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида бу борада бир қатор, хусусан: «иктисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш... қишлоқ хўжалигини модернизация қилиш ва жадал ривожлантириш... жадал ривожлантиришга қаратилган сифат жиҳатидан янги босқичга ўтказиш орқали саноатни янада модернизация ва диверсификация қилиш...»¹ каби вазифалар белгиланган. Кўрсатилган вазифаларни муваффақиятли амалга ошириш кўп жиҳатдан ғовак материалларида иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларини таҳлил, мониторинг ва башорат қилиш учун математик

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017-йил 7-февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» қарори.

аппарат ва дастурий таъминотларни янада ривожлантириш заруратини белгилайди.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018-йил 19-февралдаги ПФ-5349 «Ахборот технологиялари ва коммуникациялари соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2019-йил 23-октябрдаги ПФ-5853 «Ўзбекистон Республикаси қишлоқ хўжалигини ривожлантиришнинг 2020-2030 йилларга мўлжалланган стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида» Фармонлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга 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. Бир қатор етакчи хорижий олимлар, шу қаторда А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов, П.Д. Лебедев, М.С. Смирнов, Б.М. Будак, А.И. Леонтьев, Б.Н. Юдаев, D. Anderson, J. Tannekhil ва бошқа олимларнинг асарлари иссиқлик ва масса кўчиши мураккаб жараёнларини моделлаштиришнинг назарий асослари ва методологиясини ривожлантириш муаммоларига бағишланган. Коллоидли капилляр-ғовақ жисмларининг қуритиш жараёнларини моделлаштириш масалалари В.М. Пасконов, В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел, П.С. Коссович, А.В. Лебедев, В.Г. Горячкин, М.В. Кирпичев ва бошқа мутахассислар томонидан ўрганилган. Турли материалларни қуритиш ва сақлаш жараёнларини математик моделлаштириш масалалари М.В.Алексеев, Г.В.Кузнецов, А.А. Федяев, У.Р. Ильясов, Д.Е. Игошин, О.С. Натарева, А.М. Афанасьев, С.П. Степанов, Н.Н. Гринчик, В.И. Жидко, Б.В.Филатов, Т.Т. Afolabi, P. Horáček, D. Mihoubi, A. Bellagi, H. Wang, N.J. Warren, L.Z. Fang, K. Li ишларида кўриб чиқилган. Ўзбекистонда пахта хомашёси ва унинг компонентларини қуритиш ва сақлаш технологик жараёнларини моделлаштириш масалалари билан бевосита А.З. Маматов, А.П. Парпиев, Б.М. Мардонов, А.К. Усмонкулов, Э. Зикрияев, А.Х. Атауллаев, Н. Равшанов, Ж.И. Хўжаев ва бошқа олимлар шуғулланишган.

Юқорида келтирилган ва кўпгина бошқа хорижий ва мамлакатимиз олимларининг саъй-ҳаракатлари туфайли бугунги кунга қадар назарий ва амалий хусусиятга эга бўлган муҳим натижалар олинган бўлиб, улар қишлоқ хўжалик маҳсулотларини қайта ишлаш ва сақлашда содир бўладиган иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларини ҳар томонлама ўрганиш имконини беради. Шунга қарамасдан, қишлоқ хўжалиги маҳсулотларида иссиқлик ва намлик алмашинуви жараёнларига сезиларли таъсир этувчи ўз-ўзидан исиш, атроф-муҳит ҳарорати ҳамда қуёш радиацияси каби ташқи ва ички омилларни ҳисобга оладиган математик моделларни ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришнинг кўплаб масалалари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг БВ-М-Ф4-001 «Ғовак муҳитларда иссиқлик-масса алмашинув масалаларини қуритиш ва сақлаш жараёнларининг ахборот ва дастурий таъминотини ишлаб чиқиш» (2017-2020 йй.) мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади ғовак жисмларни (пахта хомашёси мисолида) сақлашда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини ҳисоблаш учун математик моделлар, сонли алгоритмлар ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

- ғовак жисмларда қуёш радиацияси, ички иссиқлик, намлик ажралиб чиқиш, атроф-муҳит ҳарорати ва намлиги омиллари бўйича мураккаб иссиқлик ва намлик кўчиш масалаларининг ахборот таъминотини ишлаб чиқиш;

- табиий омиллар таъсирида ғовак жисмларни сақлаш ва қуритишда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

- пахта хомашё ғарамларининг ҳарорат ва намлик ҳолатини ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиш ва ташқи омиллар ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда башоратлаш учун кўп ўлчовли математик моделларини ишлаб чиқиш;

- бир жинсли бўлмаган ғовак жинсларни сақлаш ва қуритишда ички иссиқлик ва ажралиб чиқиши, ташқи муҳит билан иссиқлик ва намлик алмашиш ва қуёш радиацияси таъсирини ҳисобга олган ҳолда биргаликда иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларининг кўп ўлчовли математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш;

- пахта хомашёсини ғарамларда сақлаш ва қуритишда ўзаро боғланган иссиқлик ва намлик кўчиши масалаларини ечиш учун сонли алгоритмларни ишлаб чиқиш;

- ғовак жинсларни сақлаш жараёнида ўзаро боғланган иссиқлик ва намлик кўчиш жараёнларини ҳисоблаш ва сонли тажрибаларнинг натижаларини визуаллаштириш учун дастурий воситаларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида ғовак жисмларда иссиқлик ва намлик кўчиши ўзаро боғлиқ жараёнлари олинган.

Тадқиқот предмети ғовак жисмларда иссиқлик ва намлик кўчиши мураккаб жараёнларини тадқиқ қилиш учун ишлаб чиқилган математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик физика, математик моделлаштириш, сонли тажриба ва дифференциал тенгламаларни ечишнинг сонли усуллари, шунингдек объектга йўналтирилган дастурлаш технологияларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

- ғовак жисмларни сақлаш ва қуритишда табиий омиллар таъсирида иссиқлик ва намлик кўчиши ўзаро боғлиқ жараёнининг математик модели ишлаб чиқилган;

- пахта хомашёси ғарамининг ҳарорат ва намлик ҳолатини ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиши, ҳарорат ўзгариши, ташқи муҳит намлиги ва қуёш радиациясини ҳисобга олган ҳолда башоратлаш учун кўп ўлчовли математик модель ишлаб чиқилган;

- ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиш, ташқи муҳит билан иссиқлик-намлик алмашинуви ва қуёш радиацияси таъсирини ҳисобга олган ҳолда бир жинсли бўлмаган ғовак жисмларни сақлаш ва қуритишда биргаликдаги иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларининг кўп ўлчовли математик модели ишлаб чиқилган;

- пахта хомашёсини сақлаш ва қуритишда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши масалаларини ечиш учун чекли-айирмали усул асосида самарали сонли алгоритмлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари куйидагилардан иборат:

ғовак материалларда – қишлоқ хўжалиги маҳсулотларида иссиқлик ва намлик алмашинуви жараёнларини таҳлил қилиш, мониторинг қилиш ва башоратлаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилди;

ишлаб чиқилган дастурлар мажмуидан фойдаланган ҳолда, пахта хомашёсини сақлаш жараёнида ҳарорат ва намликнинг ўзгаришини аниқлаш ва башорат қилиш бўйича ҳисоб-китоблар амалга оширилди, бу эса тола сифатини йўқотишнинг олдини олиш, ўз-ўзидан ёниш ҳолатлари, шунингдек, пахта хомашёсининг юқори табиий сифатларини сақлаб қолган ҳолда сақлашнинг мақбул режимларини танлаш бўйича бошқарув қарорларини қабул қилишга ёрдам берди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги иссиқлик ва намлик кўчиши тенгламалари масса, энергия ва импульс сақланиши ва кўчиши қонунлари асосида қатъий шакллантирилганлиги, тажриба маълумотлари билан сонли ҳисоблаш натижалари мослиги билан изоҳланади. Сонли усуллардан фойдаланилганда аппроксимациянинг зарурий аниқлиги, ҳисоблаш жараёнининг барқарорлиги ва яқинлашувчанлиги таъминланган, ҳисоблаш натижалари эса табиат қонунларига зид келмайди.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, улар иссиқлик ва намлик алмашинуви мураккаб жараёнларини ички ва ташқи омилларни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш, иссиқлик-намлик кўчиши дифференциал тенгламаларини сонли ечиш усулларининг ривожланишига муайян ҳисса қўшадилар.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти пахта хомашёсининг ҳарорати ошиши, ўз-ўзидан ёниб кетиши, сифат тушиб кетиши ҳолларини олдини олиш ҳамда пахта хомашёси ғарамларининг сақлаш бўйича қулай тартибини таъминлаш учун ишлаб чиқилган моделлар, алгоритмлар ва дастурий воситаларининг қўлланиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Математик моделлар, сонли алгоритмлар ва дастурлар мажмуаларини ғовак жисмларда иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини ўрганиш учун қўллаш асосида:

пахта хомашёсининг физик-механик хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда иссиқлик ва намлик ўтказиш ҳисоб-китобларини автоматлаштириш бўйича математик ва дастурий таъминот “Когон пахта тозалаш” АЖ да жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 3 ноябрдаги 33-8/7766 маълумотномаси). Натижада пахта ғарамларининг ҳарорати ва намлигини башоратлаш аниқлигини 8-10% оширишга, уларни сақлаш режимларини оптималлаштириш ва пахта хомашёси ғарамларининг ўз-ўзидан ёниб кетишини олдини олиш ҳисобига йўқотишларни камайтиришга эришилган;

пахта хомашёси ғарамларида иссиқлик ва намлик ҳолатини башоратлаш учун мўлжалланган математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар «Ғиждувон пахта тозалаш» АЖ объектларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 3 ноябрдаги 33-8/7766 маълумотномаси). Натижада пахта хомашёсини сақлаш жараёнида ҳарорат ва намлик ҳолатининг мумкин бўлган салбий таъсирини баҳолашга, шунингдек, сақлашнинг оптимал режимларини танлаш билан боғлиқ молиявий ва меҳнат харажатларини 5-7% га камайтиришга эришилган;

пахта хомашёсининг ҳарорат ва намлик ўзгаришини мониторинг ва башоратлаш учун ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминот “Пешку пахта тозалаш” МЧЖ да жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 3 ноябрдаги 33-8/7766 маълумотномаси). Натижада пахта хомашёси ғарамларининг чириши ва ўз-ўзидан ёниши оқибатларини башорат қилишнинг аниқлигини 8-10% га оширишга, шунингдек, сақлаш ва қуриштириш билан боғлиқ молиявий ва меҳнат харажатларини 5-7% га камайтиришга эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур диссертация тадқиқотининг натижалари 2 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 22 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, жумладан, 4 таси хорижий ва 6 таси республика журналларида чоп этилган ҳамда 2 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 115 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги аниқланган. Тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети кўрсатилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти асослаб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Ғовак муҳитларда иссиқлик ва намлик алмашинуви жараёнларини математик моделлаштиришнинг замонавий муаммоларига доир адабиётлар таҳлили»** деб номланган биринчи бобида классик ва замонавий илмий адабиётлар асосида иссиқлик ва намлик алмашинуви жараёнини математик ва сонли моделлаштириш масалалари бўйича илмий манбалар таҳлил этилган.

Жумладан, иссиқлик ва намлик алмашинуви масалалар шартларнинг турли-туманлиги ҳамда ғовак муҳитларда мураккаб иссиқлик ва намлик алмашинуви масалаларини ечиш усулларининг ривожланиши муҳокама қилинган. Мураккаб иссиқлик ва намлик алмашинуви масалаларнинг умумий тавсифи ҳамда турли геометрик шаклдаги ғовак жисмларни сақлаш ва қуритишда ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиши, ташқи муҳит ҳарорати ва намлиги ўзгариши каби омилларни ҳисобга олган ҳолда АКТ ни қўллаш замонавий амалиётлари келтирилган.

Ғовак жисмларни сақлаш ва қуритиш жараёнида ҳарорат ва намлик ўзгаришини аниқлашга доир турли илмий асарлар бўйича ўтказилган таҳлил асосида ғовак жисмларда иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларида қуёш радиацияси, ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиши ва ташқи омиллар ўзгаришини ҳисобга олувчи математик моделни ишлаб чиқиш зарурияти асосланган, диссертация тадқиқотининг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **«Ғовак муҳитларда табиий омиллар таъсирида иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини математик моделлаштириш»** деб номланган иккинчи бобида ғовак муҳитларда иссиқлик ва намлик ўтказишнинг кинетик коэффициентларини аниқлаш учун ишлаб чиқилган ахборот таъминотига таянган ҳолда ғовак материалларни сақлаш ва қуритишда ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиши, атроф-муҳит ҳарорати ва намлиги ўзгаришлари каби омилларни ҳисобга олувчи иссиқлик ва намлик кўчишининг икки ўлчовли математик модели ишлаб чиқилган. Ушбу модель турли геометрияга эга ғовак жисмларда иссиқлик ва намлик кўчиши бўйича кейинги бобларда ишлаб чиқилган моделлар учун асос бўлди.

Ғовак жисмларни қуритиш ва сақлаш жараёнларининг асосий кўрсаткичларини ҳисобга олган ҳолда иссиқлик-намлик кўчиш математик

моделини дифференциал тенгламалар системаси ёрдамида қуйидагича тавсифлаш мумкин:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + a_{12} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + a_{22} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \quad (2)$$

бошланғич ва чегаравий шартлар:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y); u(x, y, 0) = u_0(x, y) \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau), \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(0, z, \tau)); \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u(L_x, z, \tau)); \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, \tau)); \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, L_y, \tau)). \quad (7)$$

Бу ерда T ва u – ғовак жисмнинг ҳарорати ва намлигининг ўзгариши; a_{11}, a_{22} – ҳарорат ўтказиш коэффициентлари; a_{12}, a_{21} – намлик ўтказиш коэффициентлари; c_1 – солиштирма иссиқлик сифими; c_2 – солиштирма намлик сифими, ρ – материал зичлиги; $f = b e^{-\alpha \tau}$ – иссиқлик ички манбаларининг жадаллиги; $b = u / c_1$ – ички иссиқлик ажралиб чиқиши коэффициенти; α – эмпирик параметр; $q = \rho m_0 e^{-\xi \tau}$ – ички намлик ажралиб чиқиши жадаллиги; m_0 – буғланишнинг максимал жадаллиги; ξ – қуритиш коэффициенти (1/сек); β_1 – иссиқлик ажралиб чиқиш коэффициенти; γ – иссиқлик ютилиши коэффициенти; $R(t)$ – қуёш радиацияси оқимининг инсоляцияси; β_2 – намлик ажралиб чиқиш коэффициенти; u_{oc} – ташқи муҳит намлиги.

(1)-(7) масалани сонли ечиш алгоритми ишлаб чиқишда вақт ва координата ўзгарувчилари бўйича иккинчи тартибли аппроксимация аниқлигига эга ошқормас чекли-айирмали схема қўлланилган.

Диссертациянинг «**Пахта хомашёсини сақлаш ва қуритишда иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини ечиш учун математик моделлаштириш ва сонли усуллар**» деб номланган учинчи бобида ички иссиқлик ва намликнинг ажралиб чиқиши, қуёш радиацияси ва атроф-муҳит билан иссиқлик ва намлик алмашинуви шароитида пахта хомашёси ғарамини сақлашда иссиқлик ва намликнинг биргаликда кўчишининг кўп ўлчовли математик модели ва масалаларни ечишнинг сонли алгоритми келтирилган.

Пахта ғарами мисолида ғовак жисмларни қуритиш ва сақлаш жараёнининг асосий кўрсаткичларига таянган ҳолда иссиқлик ва намлик кўчишининг математик модели сифатида қуйидаги дифференциал тенгламалар системаси

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + a_{12} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f; \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + a_{22} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (9)$$

бошланғич

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z); \quad u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z) \quad (10)$$

ва чегаравий шартлар билан

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(0, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (11)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T(L_x, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, 0, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, L_y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (15)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, y, L_z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (16)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(0, y, z, \tau)); \quad (17)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u(L_x, y, z, \tau)); \quad (18)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, z, \tau)); \quad (19)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, L_y, z, \tau)); \quad (20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (21)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, y, L_z, \tau)) \quad (22)$$

таклиф қилинган.

Пахта хомашёси ғарамининг ташқи кўриниши тўғри бурчакли параллелепипедга яқин. Параллелепипед Декарт координаталар системасининг биринчи октантида жойлашган бўлиб, унинг ўлчамлари координаталар бўйича L_x, L_y, L_z ларни ташкил қилади.

Тегишли бошланғич ва чегаравий шартлар билан қўйилган (8)-(22) масала кўп ўзгарувчили хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар билан тавсифланганлиги туфайли амалиётда аниқ ечим топишнинг деярли иложи йўқ. Юқорида кўрсатилган ҳолатларни ҳисобга олиб, ҳар бир вақт оралиғида масалани ечиш учун координаталар бўйича ажратиш усулидан фойдаланилди.

(8)-(22) масаласини координаталар бўйича ажратиш назарияси доирасида ечиш усули учта кетма-кетликдаги кичик масалалар шаклида тақдим этилиши мумкин.

А масала:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{3} f;$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{3} q$$

бошланғич

$$T_1^0 = T_3^{n+1}; u_1^0 = u_3^{n+1}$$

ва чегаравий шартлар билан:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T_1) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T_1) - \eta \rho \gamma R(\tau);$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u_1); \quad \lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u_1).$$

Б масала:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{3} f;$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{3} q$$

бошланғич:

$$T_2^0 = T_1^{n+1}, u_2^0 = u_1^{n+1}$$

ва чегаравий шартлар билан:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T_2) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T_2) - \eta \rho \gamma R(\tau);$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u_2); \quad \lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u_2).$$

В масала:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{3} f;$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{3} q$$

бошланғич:

$$T_3^0 = T_2^{n+1}, u_3^0 = u_2^{n+1}$$

ва чегаравий шартлар билан:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T_3) - \eta \rho \gamma R(\tau);$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u_3).$$

Шундай қилиб, ҳар бир $\tau_n \leq \tau \leq \tau_{n+1}$ вақт оралиғи доирасида координаталар бўйича дастлабки масалани ажратишдан сўнг алоҳида учта А, Б ва В масалалар ҳосил бўлди. Ушбу масалалар вақт ва координаталар бўйича иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли-айирмали схемадан фойдаланиб ечилган.

Бир жинсли бўлмаган ғовак жисмларни сақлаш ва қуритиш жараёнининг иссиқлик физикасига оид кўрсаткичларининг ўзгарувчанлигини ҳисобга олиб иссиқлик ва намлик кўчиши математик модели сифатида қуйидаги дифференциал тенгламалар системаси таклиф қилинган. Ушбу тенгламалар системасида ташқи муҳит билан намлик ва иссиқлик алмашинуви, бир жинсли бўлмаган ғовак муҳит ичида иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиш манбалари ҳамда қуёш радиацияси оқимининг инсоляцияси ҳисобга олинади:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f; \quad (23)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (24)$$

(23)-(24) масала учун бошланғич ва чегаравий шартлар (10)-(22) шартлар каби қолади. Бу ерда $a(x, y, z)$ - иссиқлик ўтказиш коэффициенти; $\delta(x, y, z)$ - намлик ўтказиш коэффициенти.

Масала қўйилишидан кўриниб турибдики, тадқиқот объекти иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиш манбасига эга хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар системаси билан тавсифланган ва шу сабабли аналитик ечимни топиш қийинчилик туғдиради. Юқорида келтирилганларни ҳисобга олган ҳолда масалани ечишда чекли-айирмалар усулидан фойдаланилди.

Вақт ва фазо бўйича тўр киритилди:

$$\Omega_{xyz\tau} = \left\{ \left(x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n\Delta\tau \right); \right. \\ \left. i = \overline{1, N_x}; j = \overline{1, M_y}, k = \overline{1, L_z}, n = \overline{0, N_\tau}, \Delta\tau = 1/N_\tau \right\}.$$

(23) тенглама Ox ўқи бўйича аппроксимация қилинди ва ўхшаш ҳадлар соддалаштирилиб, уч диагоналли алгебраик тенгламалар системаси ҳосил қилинди:

$$a_{T,i,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,i,j,k}. \quad (25)$$

унда коэффициентлар ва тенгламанинг эркин ҳади қуйидаги ифодалар ёрдамида аниқланди:

$$a_{T,i,j,k} = \frac{a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad b_{T,i,j,k} = \frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad c_{T,i,j,k} = -\frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \\ d_{T,i,j,k} = \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i,j,k}^n + \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i+1,j,k}^n + \\ + \frac{a_{i,j+0,5,k} T_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ + \frac{a_{i,j,k+0,5} T_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\ + \frac{a_{i+0,5,j,k} u_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i-0,5,j,k} u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ + \frac{a_{i,j+0,5,k} u_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ + \frac{a_{i,j,k+0,5} u_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3} f_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}.$$

Сўнгра $x = 0$ даги чегаравий шарт x йўналишида аппроксимация қилиниб, қуйидагига эга бўламиз:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \quad (26)$$

бунда $\varphi = \eta\rho\gamma R(\tau)$.

(25) тенгламалар системасидан $i=1$ бўлганда $T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ топиб, (26) га қўямиз ва $T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ ни топамиз:

$$T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,0,j,k} T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,0,j,k}.$$

Бу ҳолда ҳайдаш коэффициентлар $\alpha_{T,0,j,k}, \beta_{T,0,j,k}$ қуйидаги ифодалар ёрдамида ҳисобланади:

$$\alpha_{T,0,j,k} = \frac{\lambda_1 b_{T,1,j,k} - 4\lambda_1 c_{T,1,j,k}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1},$$

$$\beta_{T,0,j,k} = \frac{-d_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1}.$$

Шунга ўхшаш тарзда $x = L_x$ учун чегаравий шартни x бўйича аппроксимация қилиб, қуйидагига эга бўламиз:

$$\lambda_1 \frac{T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}.$$

Ҳарорат кетма-кетлигининг қийматлари тескари ҳайдаш усули орқали аниқланади:

$$T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} - \lambda_1 \beta_{T,N-2,j,k} + 4\lambda_1 \beta_{T,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta x \beta_1 + \lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} - 4\lambda_1 \alpha_{T,N-1,j,k}},$$

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,i,j,k}, \quad i = \overline{N-1,1}, j = \overline{0,M}, k = \overline{0,L}.$$

Сўнгра (24) тенглама ва шартлари вақт ва фазовий ўзгарувчилар бўйича иккинчи тартибли аниқлик билан ошқормас чекли-айирмали схемадан фойдаланиб x бўйича аппроксимация қилинди. Натижада ғовак жисмда намлик қийматини ҳисоблаш учун формулаларга эга бўлинди.

Шу тарзда Oy ва Oz йўналишлари учун ҳам юқорида келтирилган амаллар бажарилади. Шундай қилиб ғовак муҳит ичида ҳарорат ва намлик ўзгаришининг координаталарга ва вақтга нисбатан боғлиқликлари олинди.

Диссертациянинг «Пахта хомашёсини сақлашда иссиқлик ва намлик алмашинуви жараёнларини тадқиқ қилиш учун дастурий таъминот» деб номланган тўртинчи бобида қуёш радиацияси катталиги, ташқи муҳит ҳарорати ва намлиги ўзгаришларини ҳисобга олган ҳолда пахта хомашёсини сақлашда иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини тадқиқ қилиш учун дастурий таъминот ишлаб чиқилган. Ҳисоблаш тажрибалари натижалари келтирилган, бундан ташқари ҳисоблаш натижаларини эмпирик натижалар билан қиёсий солиштириш ўтказилган.

Ғовак муҳитларда иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун ишлаб чиқилган моделлар ва сонли алгоритмлар асосида объектга йўналтирилган C# дастурлаш тилида «НМТ-Calc» дастурий мажмуа ишлаб чиқилди. Ушбу мажмуа қуйидагилардан иборат: берилган маълумотларини киритиш блоки; сонли интеграллаш ва ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун ҳисоблаш блоки; ўтказилган сонли ҳисоблашлар натижалари бўйича маълумотлар базасини шакллантириш блоки; сонли ҳисоблашлар натижаларини график объектлар шаклида талқин этиш блоки.

«НМТ-Calc» дастурий мажмуаси ЭҲМда ҳисоблаш тажрибасини ўтказиш орқали ғовак жисм ҳарорати ва намлигининг динамик ўзгаришини

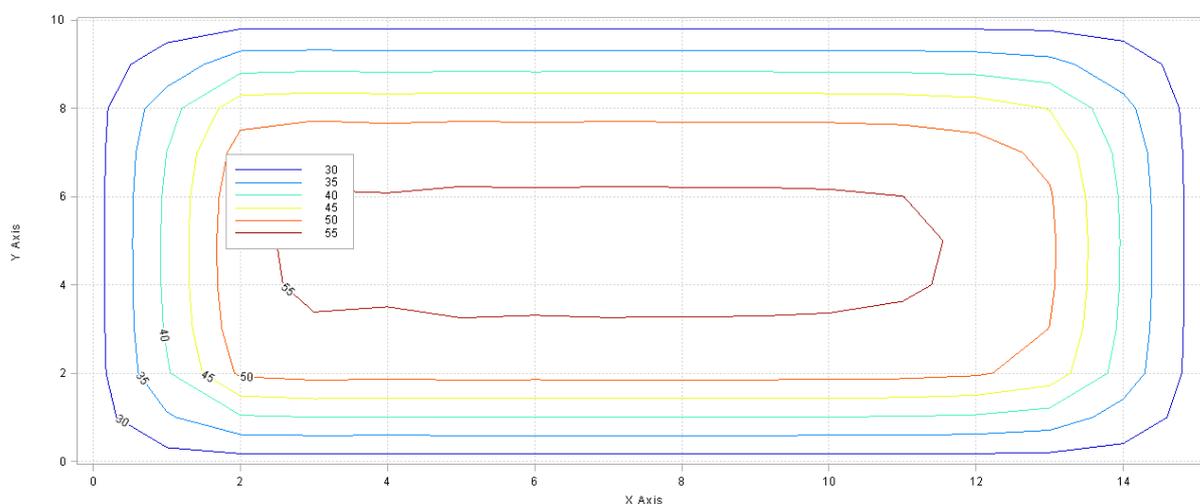
кузатиш имконияти мавжуд бўлган график интерфейсга эга (1-расм).



1-расм. «НМТ-Calc» дастурий мажмуаси интерфейси

Ҳисоблаш тижрибалари Бухоро вилоятида 2020 йил октябрь ойида ўтказилди, унда атроф-муҳит ўртача ҳарорати + 25°C (кундузи + 26°C, кечаси + 23°C), ўртача намлиги эса 36% ташкил қилди.

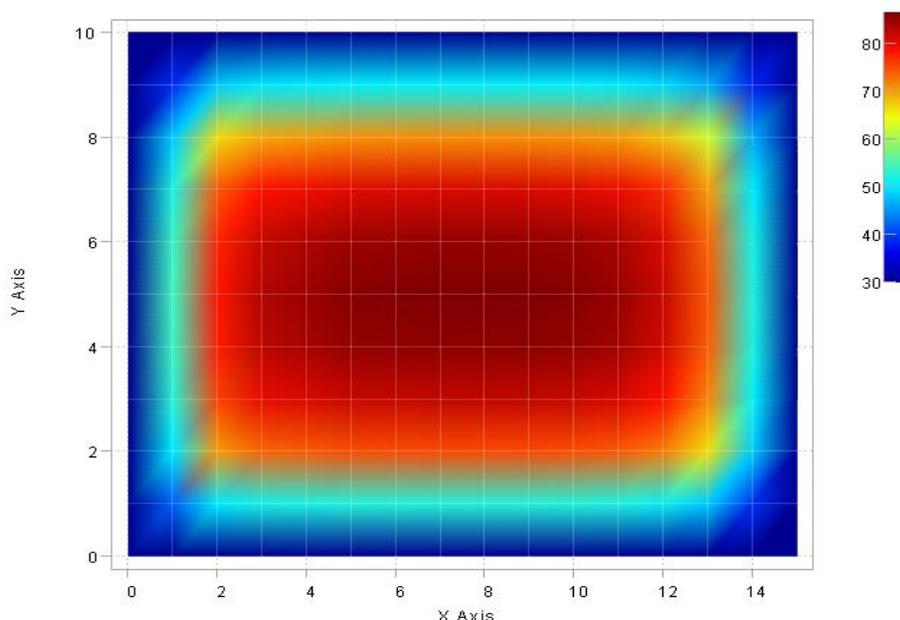
Пахта хомашёси ғарамларида ҳарорат ва намлик ўзгаришларини аниқроқ тақдим этиш учун ЭҲМда ўтказилган сонли ҳисоблашлар натижалари 2-3-расмларда қатламлар бўйича келтирилган.



2-расм. Пахта хомашёси ғарамидида 60 кун сақлашдан сўнг $z=5$ м кесимида намлик бўйича ўзгаришлар.

$$T_{oc} = 30^{\circ}C, T(x, y, z, 0) = 42^{\circ}C, u_{oc} = 30\%, u(x, y, z, 0) = 55\%$$

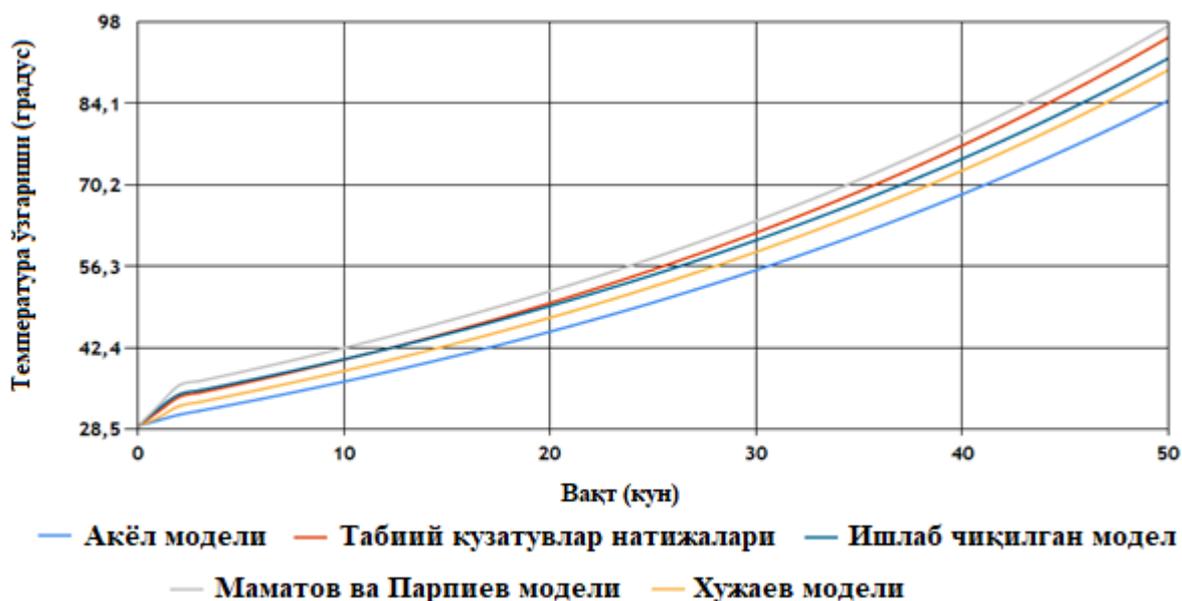
Пахта хомашёсида намлик даражаси ошиши билан ҳарорат ўтказиш коэффициенти ва иссиқлик ажралиб чиқиш жадаллиги ошиб боради. Бу эса ғарамнинг ички қисми жадал қизишига (80–90°C гача ва ундан ортиқ) олиб келади.



3-расм. Пахта хомашёси ғарамида 60 кун сақлашдан сўнг $z=5$ м кесимида ҳарорат бўйича ўзгаришлар.

$$T_{oc} = 30^{\circ}C, T(x, y, z, 0) = 42^{\circ}C, u_{oc} = 30\%, u(x, y, z, 0) = 55\%$$

Сонли тажрибалар ҳарорат ўтказиш, намлик ўтказиш коэффицентларининг турли қийматлари, пахта хомашёси намлиги ва ҳарорати бошқаларнинг турли қийматлари бўлганда ўтказилди.

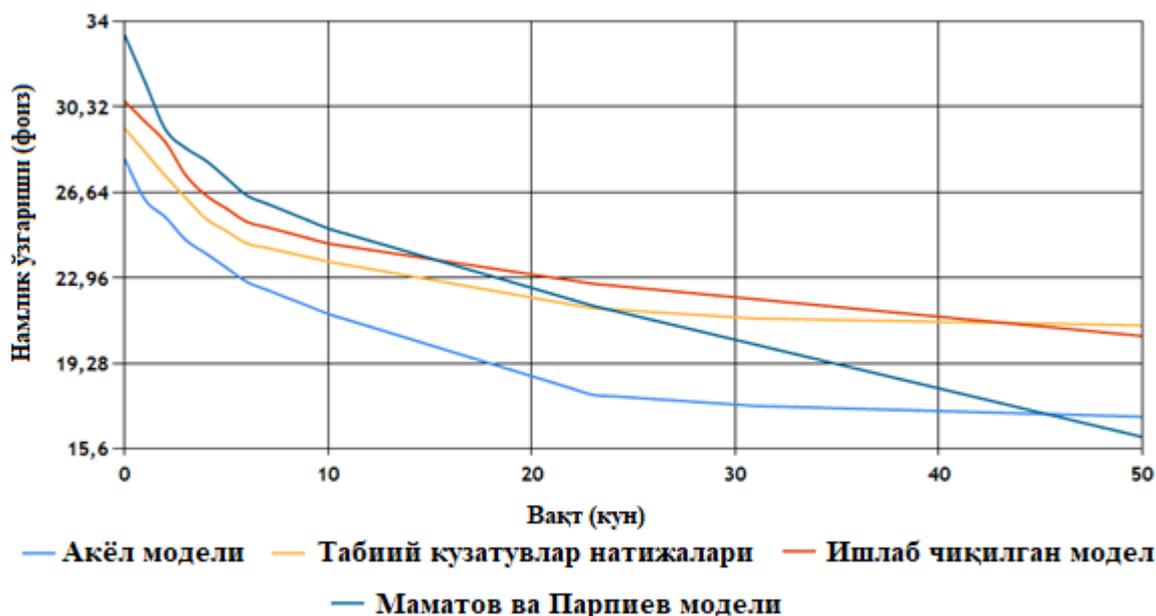


4-расм. Турли математик моделларга кўра пахта хомашёси ғарамида энг юқори ҳарорат бўйича 50 кун сақлашдан сўнг ўзгаришларини баҳолаш.

$$T_{oc} = 29^{\circ}C, T(x, y, z, 0) = 32^{\circ}C, u_{oc} = 33\%, u(x, y, z, 0) = 37\%$$

Натижаларнинг ишончилиги табиий кузатувлар натижалари ҳамда бошқа маълум бўлган математик моделларининг натижалари билан таққосланиб текширилган.

4-5-расмларда қуйида келтирилган Акьола модели, Ж.И. Хўжаев модели, А.З. Маматов ва А.П. Парпиев моделлари бўйича пахта хомашёси ғарамида ҳарорат ва намлик ўзгаришларини баҳолавчи эгри чизиқлар келтирилган.



5-расм. Турли математик моделларга кўра пахта хомашёси ғарамида энг юқори намлик бўйича 50 кун сақлашдан сўнг ўзгаришларини баҳолаш.

$$T_{oc} = 29^{\circ}C, T(x, y, z, 0) = 32^{\circ}C, u_{oc} = 33\%, u(x, y, z, 0) = 37\%$$

4- ва 5-расмлардаги эгри чизиқларга кўра, узок муддатли сақлашда энг юқори ҳарорат ва намликдаги фарқлар кўзга ташланади, бу эса тажриба хатолиги билан изоҳланади. Ички иссиқлик ва намлик ажралишини баҳолашдаги маълум юқори кўрсаткичларга қарамай, ташқи муҳит ҳарорати ва намлиги ўзгаришлари ҳисобга олинганида, ўтказилган таққослашлар асосида натижаларнинг етарли даражада мослиги таъминланган, деб ҳисоблаш мумкин.

ХУЛОСА

«Ғовак жисмларда иссиқлик-намлик кўчиш масалаларини ечиш учун модель, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотларини ишлаб чиқиш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Мураккаб иссиқлик ва намлик алмашинуви масалаларининг асосий тавсифлари, шунингдек, кишлоқ хўжалик маҳсулотларини табиий омиллар таъсирида сақлаш ва қуритишда АКТ қўллашнинг замонавий амалиётлари тадқиқ қилинди.

2. Очиқ майдонда сақланаётган маҳсулотларда қуёш радиацияси, ташқи муҳит ҳарорати ва намлиги, ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиш каби омилларни ҳисобга олувчи ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши

жараёнларини математик моделлаштириш муаммолари бўйича илмий манбаларнинг батафсил таҳлили ўтказилди.

3. Ғовак маҳсулотларни сақлашда қуёш энергияси, ички иссиқлик ва намлик ажралиб чиқиши, ташқи муҳит ҳарорати ва намлиги таъсирини ҳисобга олган ҳолда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларининг икки ўлчовли математик модели ва сонли алгоритми ишлаб чиқилди.

4. Ташқи муҳит билан иссиқлик алмашиш ва ички иссиқлик ажралиб чиқишни ҳисобга олган ҳолда уч ўлчовли пахта хомашёси ҳарорати ва намлик ҳолатининг математик модели ишлаб чиқилди ва тегишли масалани ечиш учун чекли-айирмали усул асосида сонли алгоритм ишлаб чиқилди.

5. Ички иссиқлик ажралиб чиқиши, ташқи муҳит билан иссиқлик ва намлик алмашинуви ва қуёш радиацияси таъсирини ҳисобга олган ҳолда бир жинсли бўлмаган ғовак жисмларни сақлаш ва қуритишда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларининг кўп ўлчовли математик модели ишлаб чиқилди.

6. Пахта хомашёси ғарамини сақлашда ўзаро боғлиқ иссиқлик ва намлик кўчиши масалаларини ечиш учун вақт ва фазовий ўзгарувчилар бўйича иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли-айирмали схемани қўллашга асосланган самарали сонли алгоритм ишлаб чиқилди.

7. Турли ўлчамдаги пахта хомашёси ғарамининг турли нуқталарда ҳарорат ва намлик ўзгаришини аниқлаш ва башоратлаш имконини берувчи, пахта хомашёсининг иссиқлик ва намлик кўчиши жараёнларини тадқиқ қилиш учун дастурий таъминот ишлаб чиқилди.

8. Ишлаб чиқилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурлар «Ғиждувон пахта тозалаш» АЖ, «Когон пахта тозалаш» АЖ ҳамда «Пешкў пахта тозалаш» МЖЧларга жорий қилинди. Натижада пахта хомашёсини ғарамларда сақлашнинг оптимал режимини танлаш, сақлаш жараёнини самарали бошқариш, пахта толаси сифатининг тушиб кетишини 4-5% га қисқартириш имконияти пайдо бўлди.

**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**

ШАДМАНОВ ИСТАМ УКТАМОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ И
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛО-
ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ**

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 В2019.2.PhD/T1118.

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.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Равшанов Нормакмад**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хужаев Исмагулло Кушаевич**
доктор технических наук, профессор

Мухаммадиева Дилдора Кабиловна
доктор технических наук

Ведущая организация: **Бухарский инженерно-технологический институт**

Защита диссертации состоится «25» марта 2022 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательский институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, М.Улугбекский р-н, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 1). (Адрес: 100125, г. Ташкент, М.Улугбекский р-н, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98).

Автореферат диссертации разослан «12» марта 2022 года.
(протокол рассылки № 1 от «07» марта 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 значительное внимание уделяется инновациям, ориентированным на повышение эффективности технологических процессов хранения, сушки и обработки хлопка-сырца. По данным международного консультативного комитета по хлопку (ICAC, США) за 2020-2021 гг., производителями хлопка-сырца являются более 50 стран мира, а в пятерку ведущих по объемам производства входят такие страны как: Индия (6026,0 тонн), Китай (5910,0 тонн), США (3181 тонн), Бразилия (2342,0 тонн) и Узбекистан (1028 тонн). В этой связи, указанными странами активно проводятся научно-исследовательские работы, связанные с дальнейшим развитием методологии математического моделирования и применением информационных технологий для решения ряда проблем при хранении и обработке сельскохозяйственной продукции, в частности, в условиях повышенной влажности и самовозгорания бунтов хлопка-сырца, потери качества и физических свойств хлопкового волокна.

В мире успешно реализуются научные изыскания в области математического моделирования, численных методов и разработки программно-инструментальных средств для решения задач анализа, мониторинга и прогнозирования процессов внутреннего тепло- и влагопереноса в пористых материалах. Результаты подобных исследований способны обеспечить получение качественно новых знаний об исследуемых процессах; более точные прогнозы изменения показателей сельхозпродуктов, таких как температура и влажность; усовершенствование технологических способов и оборудования с целью оптимизации условий хранения и обработки сельскохозяйственного сырья.

В Республике Узбекистан в последние годы предпринимаются широкомасштабные меры по развитию сельскохозяйственного сектора, в том числе внедрение современных информационных технологий, создание автоматизированных хранилищ сельхозпродуктов, разработка аппаратно-программных 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 аппарата и программного обеспечения для анализа, мониторинга и прогнозирования процессов тепло- и влагопереноса в пористых материалах.

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

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. Проблемам развития теоретических основ и методологии моделирования сложных процессов тепло- и массопереноса посвящены работы целого ряда выдающихся зарубежных ученых, таких как А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов, П.Д. Лебедев, М.С. Смирнов, Б.М. Будаков, А.И. Леонтьев, Б.Н. Юдаев, D. Anderson, J. Tannekhil и других. Вопросы моделирования сушильных процессов коллоидных капиллярно-пористых тел были проработаны в трудах В.М. Пасконова, В.П. Исаченко, В.А. Осиповой, А.С. Сукомел, П.С. Коссовича, А.В. Лебедева, В.Г. Горячкина, М.В. Кирпичева и др. Задачи математического моделирования процессов сушки и хранения различных материалов рассмотрены в работах М.В.Алексеева, Г.В.Кузнецова, А.А. Федяева, У.Р. Ильясова, Д.Е. Игошина, О.С. Натарева, А.М. Афанасьева, С.П. Степанова, Н.Н. Гринчик, В.И. Жидко, Б.В.Филатова, T.J. Afolabi, P. Horáček, D. Mihoubi, A. Bellagi, H. Wang, N.J. Warren, L.Z. Fang, K. Li. В Узбекистане, непосредственно, задачами моделирования технологических процессов сушки и хранения хлопка-сырца и его компонентов занимались А.З. Маматов, А.П. Парпиев, Б.М. Мардонов, А.К. Усмонкулов, Э. Зикрияев, А.Х. Атауллаев, Н. Равшанов, Ж.И. Хужаев и др.

Благодаря усилиям отмеченных и многих других зарубежных и отечественных ученых, к настоящему времени, уже получены значительные результаты теоретического и прикладного характера, позволяющие комплексно изучать процессы тепло- и влагообмена, протекающие в ходе обработки и хранения агропромышленной продукции. Однако, многие вопросы разработки и усовершенствования математических моделей, обеспечивающих учет таких внешних и внутренних факторов, как самонагрев, температура окружающей среды и солнечная радиация, значительно влияющих на процессы тепло- и влагообмена в сельскохозяйственных продуктах, до сих пор изучены недостаточно полно.

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 институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта в рамках проекта БВ-М-Ф4-001 «Математические модели и эффективные распределенные вычислительные алгоритмы для решения многомерных задач сложного теплообмена» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является разработка и усовершенствование математических моделей, численных алгоритмов и программных средств для расчета процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении пористых тел (на примере хлопка-сырца).

Задачи исследования:

- разработка информационного обеспечения задач сложного тепло- и влагопереноса в пористых телах по факторам солнечной радиации, внутреннего тепловлаговыделения, температуры и влажности окружающей среды;

- разработка математических моделей процессов взаимосвязанного тепло-и влагопереноса при хранении и сушке пористых тел под воздействием естественных факторов;

- разработка многомерных математических моделей для прогнозирования температурного и влажностного состояния бунтов хлопка-сырца с учетом внутреннего тепловлаговыделения и изменения внешних факторов;

- разработка и усовершенствование многомерных математических моделей процессов совместного тепло-и влагопереноса при хранении и сушке неоднородных пористых тел с учетом внутреннего тепловлаговыделения, тепловлагообмена с окружающей средой и влияния солнечной радиации;

- разработка численных алгоритмов для решения задач взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке хлопка-сырца в бунтах;

- разработка программных средств для расчета процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении пористых тел и визуализации результатов вычислительных экспериментов.

Объектом исследования являются процессы взаимосвязанного тепло- и влагопереноса в пористых телах.

Предметом исследования являются математические модели, вычислительные алгоритмы и программные средства для исследования процессов сложного тепло- и влагообмена в пористых телах.

Методы исследования. В ходе исследования применялись методы математической физики, методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, численные методы решения дифференциальных уравнений, а также технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработана математическая модель процесса взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке пористых тел под воздействием естественных факторов;

- разработана многомерная математическая модель для прогнозирования температурного и влажностного состояния бунта хлопко-сырца с учетом внутреннего тепловлаговыведения, изменения температуры и влажности окружающей среды и солнечной радиации;

- разработана многомерная математическая модель процессов совместного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке неоднородных пористых тел с учетом внутреннего тепловлаговыведения, тепловлагообмена с окружающей средой и влияния солнечной радиации;

- на основе конечно-разностного метода разработаны эффективные численные алгоритмы для решения задач взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке бунтов хлопко-сырца.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан программный комплекс для анализа, мониторинга и прогнозирования процессов тепло- и влагообмена в пористых материалах – продуктах агропромышленного производства;

с помощью разработанного программного комплекса были проведены расчеты по определению и прогнозу изменений температуры и влажности бунтов хлопко-сырца в процессе их хранения, что обеспечило поддержку принятия управленческих решений по выбору оптимальных режимов хранения с целью предотвращения потерь качества волокна и случаев самовозгорания, а также сохранения высоких натуральных качеств хлопко-сырца.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов исследования обосновывается тем, что уравнения тепло- и влагопереноса сформулированы в строгом соответствии с законами сохранения и переноса массы, энергии и импульса, а также согласием результатов численных расчетов с экспериментальными данными. При использовании численных методов обеспечены необходимые точность аппроксимации, устойчивость и сходимость вычислительного процесса, а результаты расчётов не противоречат законам природы.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они вносят определенный вклад в развитие методов математического моделирования процессов сложного тепло- и влагообмена с учетом внутренних и внешних факторов, а также численного решения дифференциальных уравнений тепловлагопереноса.

Практическая значимость результатов исследования объясняется применением разработанных моделей, алгоритмов и программных средств для своевременного предотвращения случаев повышения температуры, самовозгорания и потери качества хлопкового волокна, а также обеспечения оптимальных режимов хранения бунтов хлопко-сырца.

Внедрение результатов исследования. На основе применения математических моделей, численных алгоритмов и программного комплекса для исследования процессов тепло- и влагопереноса в пористых телах:

математическое и программное обеспечение для автоматизации расчетов тепло-влажнопереноса с учетом физико-механических свойств хлопка-сырца внедрено в АО «Когон пахта тозалаш» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7766 от 3 ноября 2021 года). В результате обеспечена возможность увеличить точность прогнозирования температуры и влажности бунтов хлопка-сырца на 8-10%, оптимизировать режимы их хранения и сократить потери за счет предупреждения прения и самовозгорания бунтов хлопка-сырца;

математические модели, вычислительные алгоритмы и программные средства для прогнозирования температурно-влажного состояния бунтов хлопка-сырца внедрены в АО «Гиждувон пахта тозалаш» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7766 от 3 ноября 2021 года). В результате обеспечена возможность оценивать потенциальное негативное воздействие температурно-влажного состояния хлопка-сырца при его хранении, а также сократить на 5-7% финансовые и трудовые затраты, связанные с выбором оптимальных режимов хранения;

математическое и программное обеспечение для мониторинга и прогнозирования изменений температуры и влажности бунтов хлопка-сырца внедрено в ООО «Пешку пахта тозалаш» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7766 от 3 ноября 2021 года). В результате обеспечена возможность повысить точность прогнозирования эффектов прения и самовозгорания бунтов хлопка-сырца на 8-10%, а также сократить на 5-7% финансовые и трудовые затраты, связанные с хранением и сушкой хлопка-сырца;

Апробация результатов исследования. Результаты данного диссертационного исследования были обсуждены на 2 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, из которых 10 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 4 в зарубежных и 6 в республиканских журналах, а также получены 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 115 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определено соответствие темы исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Сформулированы цель и задачи исследования, указаны объект и предмет

исследования, обоснована достоверность полученных результатов, изложены научная и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследования на практике, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Обзор литератур по современным проблемам математического моделирования процессов тепло-и влагообмена в пористых средах»** проведен анализ вопросов развития математического и численного моделирования процессов тепло- и влагообмена на основе классической и современной литературы.

В частности, обсуждены разнообразие условий задач тепло-и влагообмена и развитие методов решения задач сложного тепло- и влагообмена в пористых средах. Даны общие характеристика задач сложного тепло- и влагообмена, а также современные практики применения ИКТ при хранении сельхозпродуктов, учитывающие такие факторы, как собственное тепловлаговыведение, влияние изменений температуры и влаги окружающей среды при хранении и сушке пористых тел различной геометрии.

На основании проведенного анализа различных научных работ по определению изменений температуры и влаги в процессе хранения и сушки пористых тел обоснована необходимость разработки математической модели процессов тепло- и влагопереноса в пористых телах с учетом солнечной радиации, внутреннего тепловлаговыведения и изменения внешних факторов, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации **«Математическое моделирование процессов тепло- и влагопереноса в пористых средах под воздействием естественных факторов»** с упором на разработанное информационное обеспечение для определения кинетических коэффициентов теплопроводности и влагопроводности в пористых средах, разработана двумерная математическая модель тепло- и влагопереноса, учитывающая такие факторы, как собственное тепловлаговыведение, влияние изменений температуры и влаги окружающей среды при хранении и сушке пористых материалов. Данная модель является базовой для разработанных в последующих главах моделей тепло- и влагопереноса в пористых телах различной геометрии.

Учитывая основные показатели процессов сушки и хранения пористых тел, математическую модель тепло- и влагопереноса можно описать с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + a_{12} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + a_{22} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \quad (2)$$

с начальным и граничным условиями:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y), \quad u(x, y, 0) = u_0(x, y); \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(0, z, \tau)); \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u(L_x, z, \tau)); \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, \tau)); \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, L_y, \tau)). \quad (7)$$

Здесь T и u – изменение температуры и влаги пористого тела; a_{11}, a_{22} – коэффициенты температуропроводности; a_{12}, a_{21} – коэффициенты влагопроводности; c_1 – удельная теплоемкость; c_2 – удельная влагоемкость, ρ – плотность материала; $f = b \cdot e^{-\alpha \tau}$ – интенсивность внутренних источников тепла; $b = \frac{u}{c_1}$ – коэффициент тепловыделения; α – эмпирический параметр; $q = \rho m_0 e^{-\xi \tau}$ – интенсивность внутренних источников влаги; m_0 – максимальная интенсивность испарения; ξ – коэффициент сушки ($1/сек$); β_1 – коэффициент теплоотдачи; γ – коэффициент поглощения; $R(t)$ – инсоляция потока солнечной радиации; β_2 – коэффициент влагоотдачи; u_{oc} – влажность окружающей среды.

При разработке численного алгоритма решения задачи (1)-(7) использована неявная конечно-разностная схема со вторым порядком аппроксимации по времени и пространственным переменным.

В третьей главе диссертации «**Математическое моделирование и численные методы для решения процессов тепло- и влагопереноса при хранении и сушке хлопка-сырца**» приводятся многомерная математическая модель и численный алгоритм для решения совместного тепло- и влагопереноса при хранении хлопка-сырца в бунте в условиях собственного тепловлаговыделения, солнечной радиации и тепловлагообмена с окружающим воздухом.

Исходя из предположений об основных показателях процесса сушки и хранения пористых тел, на примере бунта хлопка-сырца, в качестве математической модели тепло-влагопереноса предложена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{11} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + a_{12} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f; \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{21} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + a_{22} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (9)$$

с начальными

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z); u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z) \quad (10)$$

и граничными условия

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(0, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (11)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T(L_x, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, 0, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, L_y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (15)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, y, L_z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (16)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(0, y, z, \tau)); \quad (17)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u(L_x, y, z, \tau)); \quad (18)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, z, \tau)); \quad (19)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, L_y, z, \tau)); \quad (20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (21)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, y, L_z, \tau)). \quad (22)$$

Внешняя форма бунта хлопка-сырца близка к прямоугольному параллелепипеду. Параллелепипед расположен в первом октанте декартовой системы координат и размеры его по координатам составляют L_x, L_y, L_z .

Так как поставленная задача (8)-(22) описывается многомерными дифференциальными уравнениями в частных производных с соответствующими начальными и краевыми условиями, то найти ее точное решение в аналитической форме практически невозможно.

Учитывая эти обстоятельства, для решения задачи используем метод расщепления по координатам на каждом временном слое.

В рамках теории метода покоординатного расщепления метод решения задачи (8)-(22) может быть представлен в виде трех последовательно решаемых подзадач.

Задача А:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} &= a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{3} f; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{3} q\end{aligned}$$

с начальными:

$$T_1^0 = T_3^{n+1}, u_1^0 = u_3^{n+1}$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned}\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -\beta_1 (T_{oc} - T_1) - \eta \rho \gamma R(\tau); & \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= -\beta_1 (T_{oc} - T_1) - \eta \rho \gamma R(\tau); \\ \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -\beta_2 (u_{oc} - u_1); & \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= -\beta_2 (u_{oc} - u_1).\end{aligned}$$

Задача Б:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} &= a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{3} f; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{3} q\end{aligned}$$

с начальными:

$$T_2^0 = T_1^{n+1}, u_2^0 = u_1^{n+1}$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned}\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= -\beta_1 (T_{oc} - T_2) - \eta \rho \gamma R(\tau); & \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= -\beta_1 (T_{oc} - T_2) - \eta \rho \gamma R(\tau) \\ \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} &= -\beta_2 (u_{oc} - u_2); & \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= -\beta_2 (u_{oc} - u_2).\end{aligned}$$

Задача В:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} &= a_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{3} f; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + a_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{3} q\end{aligned}$$

с начальными:

$$T_3^0 = T_2^{n+1}, u_3^0 = u_2^{n+1}$$

и граничными условиями:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T_3) - \eta \rho \gamma R(\tau);$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u_3).$$

Таким образом, после расщепления исходной задачи по координатам в пределах каждого временного интервала $\tau_n \leq \tau \leq \tau_{n+1}$ получили три отдельные подзадачи А, Б и В, которые будем решать, используя неявную конечно-разностную схему по времени и со вторым порядком точности по координатам.

Учитывая переменность основных теплофизических показателей процесса сушки и хранения неоднородных пористых тел, в качестве математической модели тепло-и влагопереноса предложена следующая система дифференциальных уравнений, где учитываются влаго-и теплообмен с окружающей средой, источники выделения тепла и влаги внутри неоднородной пористой среды и инсоляции потока солнечной радиации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \end{aligned} \quad (24)$$

Начальные и граничные условия для задачи (23)-(24) остаются аналогичными условиям (10)-(22). Здесь $a(x, y, z)$ – коэффициент теплопроводности; $\delta(x, y, z)$ – коэффициент влагопроводности.

Из постановки задачи видно, что объект исследования описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных с источником тепло- и влаговыделения, следовательно получить аналитическое решение затруднительно. С учетом этого для ее решения используем конечно-разностный метод.

Введем пространственно-временную сетку:

$$\begin{aligned} \Omega_{xyz\tau} = & \left\{ (x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n \Delta \tau); \right. \\ & \left. i = \overline{1, N_x}; j = \overline{1, M_y}, k = \overline{1, L_z}, n = \overline{0, N_\tau}, \Delta \tau = 1 / N_\tau \right\}. \end{aligned}$$

Уравнение (23) аппроксимируем по Ox и, группируя подобные члены, получим систему трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$a_{T,i,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,i,j,k}, \quad (25)$$

где коэффициенты и свободный член уравнения определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned}
a_{T,i,j,k} &= \frac{a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad b_{T,i,j,k} = \frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad c_{T,i,j,k} = -\frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \\
d_{T,i,j,k} &= \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i,j,k}^n + \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i+1,j,k}^n + \\
&+ \frac{a_{i,j+0,5,k} T_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\
&+ \frac{a_{i,j,k+0,5} T_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\
&+ \frac{a_{i+0,5,j,k} u_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i-0,5,j,k} u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\
&+ \frac{a_{i,j+0,5,k} u_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\
&+ \frac{a_{i,j,k+0,5} u_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3} f_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}.
\end{aligned}$$

Далее, нижеследующее граничное условие аппроксимируем по Ox и при $x=0$ получим:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \quad (26)$$

где $\varphi = \eta\rho\gamma R(\tau)$.

Из системы уравнений (25) при $i=1$ находим $T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ и, поставив в (26), найдем $T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,0,j,k} T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,0,j,k},$$

где прогоночные коэффициенты $\alpha_{T,0,j,k}, \beta_{T,0,j,k}$ вычисляются с помощью:

$$\begin{aligned}
\alpha_{T,0,j,k} &= \frac{\lambda_1 b_{T,1,j,k} - 4\lambda_1 c_{T,1,j,k}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1}, \\
\beta_{T,0,j,k} &= \frac{-d_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1}.
\end{aligned}$$

Аналогично аппроксимируя граничное условие при $x=L_x$ по Ox получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}.$$

Значения последовательности температуры определяются методом обратной прогонки:

$$T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} - \lambda_1 \beta_{T,N-2,j,k} + 4\lambda_1 \beta_{T,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta x \beta_1 + \lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} - 4\lambda_1 \alpha_{T,N-1,j,k}},$$

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,i,j,k}, \quad i = \overline{N-1,1}, j = \overline{0,M}, k = \overline{0,L}.$$

Далее уравнение (24) аппроксимируем по Ox используя неявную конечно-разностную схему со вторым порядком аппроксимации по времени и пространственным переменным. В результате получаем формулы для вычисления значений влаги в пористой теле.

Аналогично, вышеуказанные действия выполняем для направлений Oy и Oz . Таким образом, получим пространственно-временные зависимости распределения температуры и влаги внутри пористой среды.

В четвертой главе диссертации «**Программное обеспечение для исследования процессов тепло- и влагопереноса при хранении хлопко-сырца**» разработано программное обеспечение для исследования процессов тепло- и влагопереноса при хранении хлопко-сырца с учетом изменений интенсивности солнечной радиации, температуры и влажности окружающей среды. Приведены результаты вычислительных экспериментов, а также сопоставление расчетных и эмпирических данных.

Для мониторинга и прогнозирования процессов тепло-и влагопереноса в пористых средах на основе разработанных математических моделей и численных алгоритмов создан программный комплекс «НМТ-Calс» на объектно-ориентированном языке C#. Программный комплекс состоит из блока для ввода входных данных; вычислительного блока для численного интегрирования и проведения вычислительных экспериментов; блока для формирования базы данных по результатам проведенных численных расчетов; блока для интерпретации результатов численных расчетов в виде графических объектов.

Программный комплекс «НМТ-Calс» имеет графический интерфейс, с помощью которого можно вести наблюдение за динамическим изменением температуры и влаги пористого тела (рис. 1) путем проведения вычислительных экспериментов.



Рис. 1. Интерфейс программного комплекса «НМТ-Calc»

Вычислительные эксперименты проводились в октябре 2020 года в Бухарской области, где средняя температура окружающей среды составляла + 25°C (днем + 26°C, ночью + 23°C), а средняя влажность окружающей среды составляла 36%.

Для наглядного представления изменений температуры и влаги в бунтах хлопка-сырца, результаты проведенных численных расчетов на ЭВМ приведены по слоям на рисунках 2-3.

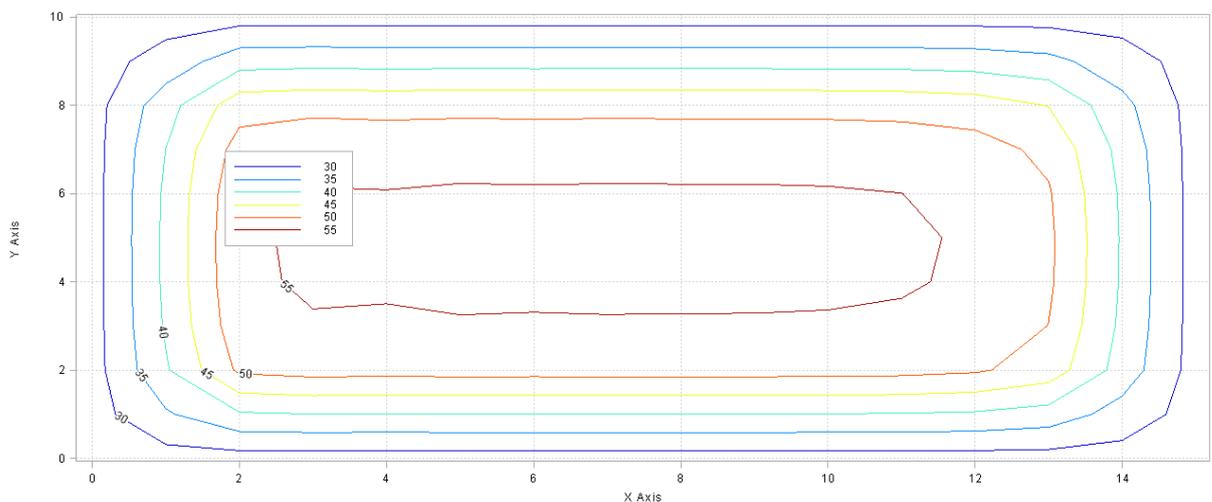


Рис. 2. Изменение влажности в бунте хлопка-сырца после 60 дней хранения в сечении $z=5$ м.

$$T_{oc} = 30^{\circ}C; T(x, y, z, 0) = 42^{\circ}C; u_{oc} = 30\%; u(x, y, z, 0) = 55\%$$

С увеличением влагосодержания хлопка-сырца значения коэффициента температуропроводности и интенсивности тепловыделения увеличиваются. Это приводит к более интенсивному нагреванию внутренней части бунта (до 80–90°C и выше).

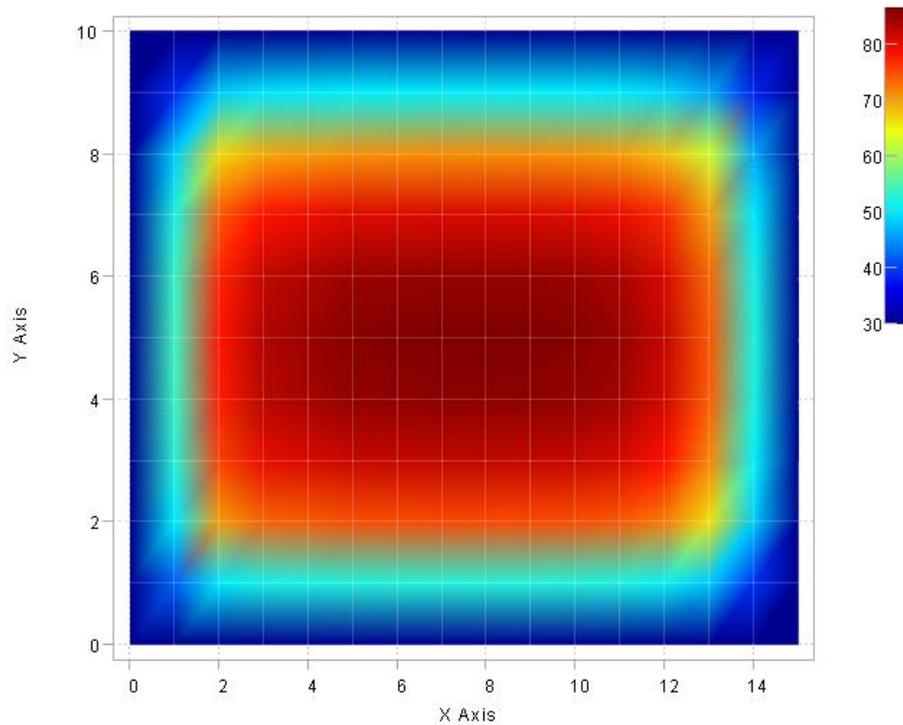


Рис. 3. Изменение наибольшей температуры в бунте хлопка-сырца после 60 дней хранения в сечении $z=5$ м.

$$T_{oc} = 30^{\circ}C; T(x, y, z, 0) = 42^{\circ}C; u_{oc} = 30\%; u(x, y, z, 0) = 55\%$$

Численные эксперименты проводились при различных значениях коэффициентов теплопроводности, влажностепроводности, различных значениях влажности и температуры хлопка-сырца и т.д.

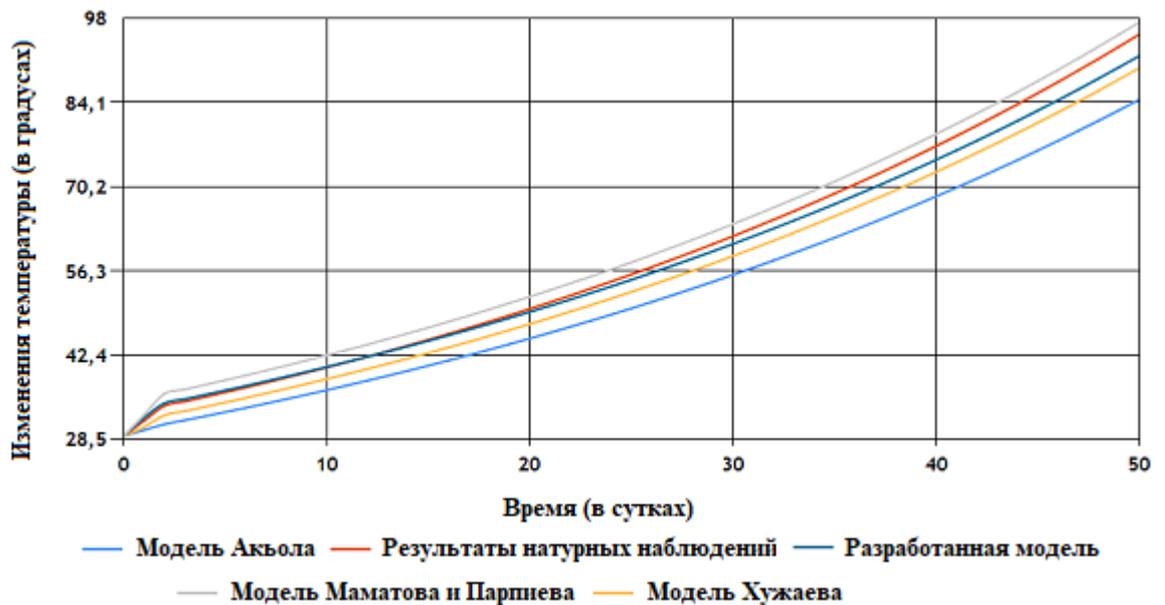


Рис. 4. Оценка изменения наибольшей температуры в бунте хлопка-сырца по различным математическим моделям после 50 дней хранения.

$$T_{oc} = 29^{\circ}C; T(x, y, z, 0) = 32^{\circ}C; u_{oc} = 33\%; u(x, y, z, 0) = 37\%$$

Достоверность результатов проверена сравнением их с результатами натуральных наблюдений и результатами расчетов по другим известным математическим моделям.

На рисунках 4-5 приведены кривые, отражающие оценки изменения температуры и влаги в бунте хлопка-сырца по следующему рассматриваемым моделям: модель Акьола, модель Ж.И. Хужаева, модель А.З. Маматова и А.П. Парпиева.

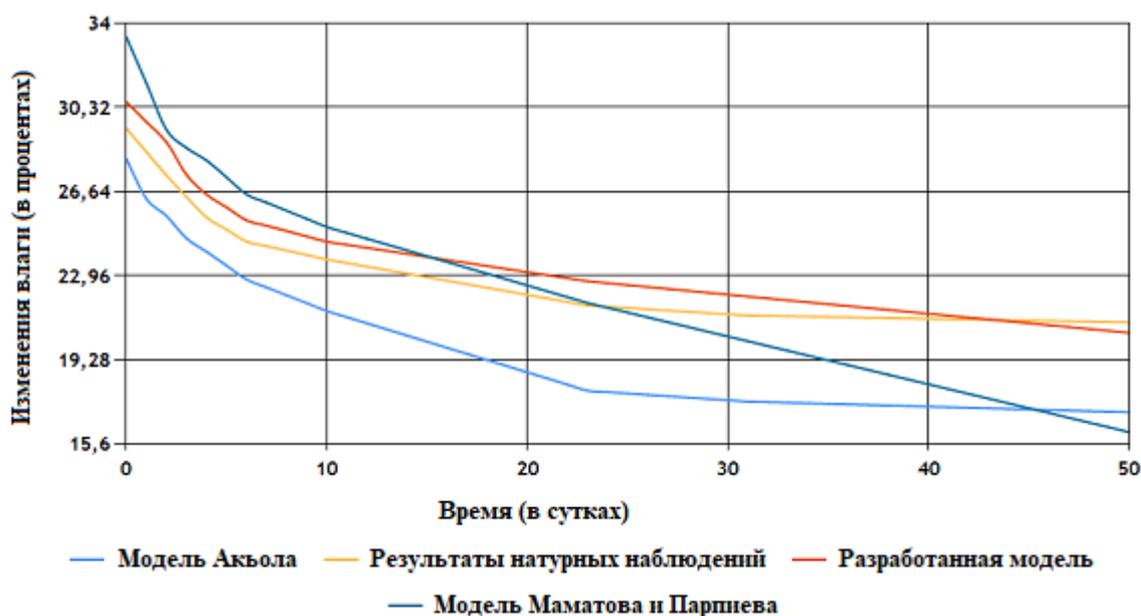


Рис. 5. Оценка изменения наибольшей влажности в бунте хлопка-сырца по различным математическим моделям после 50 дней хранения.

$$T_{oc} = 29^{\circ}C; T(x, y, z, 0) = 32^{\circ}C; u_{oc} = 33\%; u(x, y, z, 0) = 37\%$$

Согласно кривым на рисунках 4 и 5, в случае длительного хранения различия в оценке наибольших значений температуры и влаги более заметны, что вероятно объясняется погрешностями эксперимента. Тем не менее, учитывая, некоторое завышение в оценках внутреннего тепловлаговыведения, изменения температуры и влажности окружающей среды, результаты проведенного сравнения можно считать достаточно согласованными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы на тему «Разработка моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для решения задач тепло-влажноперевода в пористых телах», сводятся к следующему:

1. Исследованы основные характеристики задач сложного тепло- и влагообмена, а также современные практики применения ИКТ при хранении и сушке сельхозпродуктов под воздействием естественных факторов.

2. Проведен подробный анализ литературных источников по проблемам математического моделирования процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса в продуктах, хранимых в открытом пространстве с учетом факторов солнечной радиации, температуры и влажности окружающей среды и внутреннего тепловлаговыделения.

3. Разработана двумерная математическая модель и численный алгоритм процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении пористых продуктов с учетом влияния солнечной радиации, внутреннего тепло- и влаговыделения, температуры и влажности окружающей среды.

4. Разработаны математическая модель температурного и влажностного состояния трехмерного бунта хлопка-сырца, учитывающая внутреннее тепловыделение и теплообмен с окружающей средой, и численный алгоритм решения соответствующей задачи на основе конечно-разностного метода.

5. Разработана многомерная математическая модель процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке неоднородных пористых тел с учетом внутреннего тепловлаговыделения, тепловлагообмена с окружающей средой и влияния солнечной радиации.

6. Разработан эффективный численный алгоритм решения задач взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке хлопка-сырца в бунтах, основанный на применении неявной конечно-разностной схемы со вторым порядком точности по времени и пространственным переменным.

7. Разработано программное обеспечение для исследования процессов тепло- и влагопереноса при хранении хлопка-сырца, позволяющее определять и прогнозировать изменения температуры и влажности в произвольных точках бунта хлопка-сырца с разными размерами.

8. Разработанные математические модели, алгоритмы и программы внедрены в объектах АО «Гиждувон пахта тозалаш», АО «Когон пахта тозалаш» и ООО «Пешку пахта тозалаш». В результате внедрения обеспечена возможность выбора оптимальных режимов хранения хлопка-сырца в бунтах, а также эффективного управления процессом хранения с уменьшением потери качества хлопковолокна до 4-5%.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

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

SHADMANOV ISTAM UKTAMOVICH

**DEVELOPMENT OF MODELS, COMPUTATIONAL ALGORITHMS AND
SOFTWARE FOR SOLVING PROBLEMS OF HEAT AND MOISTURE
TRANSFER IN POROUS BODIES**

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 B2019.2.PhD/T1118.

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: **Khuzhaev Ismatullo Kushaevich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Muhammadieva Dildora Kabilovna
Doctor of Technical Sciences

Leading organization: **Bukhara Engineering and Technology Institute**

The defense will take place "25" march 2022 at 14⁰⁰ 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. 1). (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98).

Abstract of dissertation sent out on "12" march 2022 y.
(mailing report No. 1 on "07" march 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
the scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Docent

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is the development and improve mathematical models, numerical algorithms and software for calculating the processes of interrelated heat and moisture transfer during storage of porous bodies (on the example of raw cotton).

The objects of the research work are the processes of interrelated heat and moisture transfer in porous bodies.

The scientific novelty of the research work is as follows:

a mathematical model has been developed for the process of interconnected heat and moisture transfer during storage and drying of porous bodies under the influence of natural factors;

a multidimensional mathematical model has been developed to predict the temperature and humidity state of raw cotton, taking into account the internal heat and moisture release, changes in the temperature and humidity of the environment and solar radiation;

a multidimensional mathematical model has been developed for the processes of joint heat and moisture transfer during storage and drying of heterogeneous porous bodies, taking into account the internal heat and moisture release, heat and moisture exchange with the environment and the influence of solar radiation;

on the basis of the finite-difference method, effective numerical algorithms have been developed to solve the problems of interrelated heat and moisture transfer during storage and drying of raw cotton.

Implementation of obtained results. Based on the use of mathematical models, numerical algorithms and program complex for studying the processes of heat and moisture transfer in porous bodies:

mathematical and software for automating the calculations of heat and moisture transfer, taking into account the physical and mechanical properties of raw cotton, was implemented at “Kogon pakhta tozalash” JSC (Reference of the Ministry for the development of information technologies and communications No. 33-8/7766 dated November 3, 2021). As a result of scientific research, provided the opportunity to increase the accuracy of forecasting the temperature and humidity of raw cotton by 8-10%, optimize their storage modes and reduce losses by preventing rot and spontaneous combustion of raw cotton;

mathematical models, computational algorithms and software tools for predicting the temperature-humid state of raw cotton have been implemented at "Gizhduvon pakhta tozalash" JSC (Reference of the Ministry for the development of information technologies and communications No. 33-8/7766 dated November 3, 2021). As a result of scientific research, provided the opportunity to assess the potential negative impact of the temperature-humid state of raw cotton during its storage, as well as to reduce financial and labor costs by 5-7% associated with the choice of optimal storage modes;

mathematical and software for monitoring and predicting changes in temperature and humidity of raw cotton has been implemented at “Peshku pakhta tozalash” LLC (Reference of the Ministry for the development of information

technologies and communications No. 33-8/7766 dated November 3, 2021). As a result of scientific research, provided the opportunity to increase the accuracy of predicting the effects of preventing rot and spontaneous combustion of raw cotton by 8-10%, as well as to reduce by 5-7% financial and labor costs associated with the storage and drying of raw cotton.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 115 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Ravshanov N., Shadmanov I. U. and Kravets O. J. Mathematical model for the study and prediction of a porous body thermal state // Materials Science and Engineering. London. 2019. Volume 537, Issue 2. – P. 1-8. (№3; Scopus; IF=0.53).
2. Ravshanov N. Shadmanov I. U. Mathematical model of the thermal state of porous body // Научно-технический и информационно-аналитический журнал ТУИТ. 2019. – № 1(49). – С. 61–67. (05.00.00; №31).
3. Равшанов Н., Шадманов И. У. Математическая модель термического состояния трехмерного пористого тела под влиянием солнечной энергии // Информационные технологии моделирования и управления. Научно-технический журнал. Воронеж. 2019. – № 4(118) – С. 258–268. (05.00.00; №43).
4. Шадманов И. У. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в пористой пластине // Развитие науки и технологий. Научно – технический журнал. Бухара. 2019. – № 5. – С. 182–188. (05.00.00; №24).
5. Ravshanov N., Shadmanov I. U. Multidimensional model of heat-moisture transport in porous media // Journal of Physics: Conference Series. London. 2020. Vol. 1546, – P. 1-11. (№3; Scopus; IF=0.54).
6. Равшанов Н., Шадманов И. У. Моделирование и исследование процессов тепловлагопереноса в пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. – №1(31). – С. 76–90. (05.00.00; №23).
7. Шадманов И. У. Математическая модель и эффективный численный алгоритм для исследования процессов тепло-влажнопере- носа в пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики, 2021. – №2(32). – С. 117–135. (05.00.00; №23).
8. Ravshanov N., Shadmanov I. U., Kubyashev K., Khikmatullaev S. Mathematical modeling and research of heat and moisture transfer processes in porous media // E3S Web Conf. – 2021. – Vol. 264. Art No. 01038. – P. 1-19.
9. Shadmanov I.U. Mathematical modeling and experimental results of heat and moisture transfer processes in raw cotton // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2021. – № 3(125) – С. 207–215. (05.00.00; №43).
10. Равшанов Н., Шадманов И. У. Математическая модель и эффективный численный алгоритм для исследования процессов тепло-влажнопере- носа в неоднородных пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. – №6/1(37). – С. 75–89. (05.00.00; №23).

II бўлим (II часть; II part)

11. Хамдамов Р. Х., Шадманов И. У. Математическое моделирование процесса тепловлагоденоса в пористых телах // Инновационные идеи, разработки и современные проблемы их применения в производстве, а также в обучении: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф., 15 апреля 2019., Андижан. – С. 150–152.

12. Шадманов И. У. Программное обеспечение для процесса теплоденоса в пористых телах с условием воздействия внутренних и внешних факторов // Актуальные проблемы внедрения инновационных технологий и технологий в химической промышленности, промышленности строительных материалов и смежных отраслях: сб. материалов I междунар. науч.-практ. конф., 24-25 мая 2019., Фергана. – С. 245–251.

13. Равшанов Н., Шадманов И. У. Математический модель процесса тепло- и влагоденоса при хранении и сушки пористых тел // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: сб. докладов респ. науч.-техн. конф., 5-6 сентября 2019., Самарканд. – С. 204–211.

14. Равшанов Н., Шадманов И. У. Моделирование процессов тепло- влагоденоса в пористых телах // Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф., 14-15 ноября, 2019., Ташкент. – С. 98–99.

15. Shadmanov I. U. Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in porous bodies // Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратиш мавзусида профессор-ўқитувчилар ва талабаларнинг XV-илмий-амалий конференцияси. 2020 йил, 5 март. Самарканд. – С. 57–60.

16. Шадманов И. У. Программное обеспечение для вычисления процессов тепло- влагоденоса в пористых сельскохозяйственных продуктах // Математиканинг замонавий масалалари муаммолар ва ечимлар. Республика илмий анжумани, Термиз 21-23 октябрь 2020 йил. – С 322–326.

17. Shadmanov I.U. Mathematical model and numerical analysis of heat and moisture transfer for porous agricultural products // Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари. Сб. докладов респ. науч.-техн. конф. 23-24 октябрь, 2020. Карши, 2020. – С. 131–134.

18. Шадманов И. У., Фатуллаева М. Ш. Математическая модель термического состояния хранимых сельскохозяйственных продуктов с учетом собственного тепловыделения и теплообмена с окружающей средой // Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф. 15 апреля 2021. Бухара. – С. 78–80.

19. Шадманов И. У. Программное обеспечение для исследования процессов тепло- и влагоденоса при хранении хлопка-сырца // International Conference on Social and Humanitarian Research. 17-18th September, 2021,

Poland, 2021. – P. 65–73.

20. Shadmanov I.U. Simulation and experimental study of heat and moisture transfer processes in cotton // International Conference on Applied Sciences. 24-25th Sept., London, 2021. – P. 35–42.

21. Равшанов Н., Шадманов И. У., Программа для ЭВМ «НМТ-Calс» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 09246. 02.10.2020 г.

22. Равшанов Н., Шадманов И. У., Программа для ЭВМ «НМТ-Visualization» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 10865. 09.03.2021 г.

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