

31

**ТШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.13/30.12.2019. Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ШАФИЕВ ТУРСУН РУСТАМОВИЧ**

**ЗАРАРЛИ МОДДАЛАРНИНГ АТМОСФЕРАДА КЎЧИШИ ВА  
ДИФФУЗИЯ ЖАРАЁНИНИ МОНИТОРИНГ ВА БАШОРАТЛАШ  
УЧУН ЧИЗИҚСИЗ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРНИ, ҲИСОБЛАШ  
АЛГОРИТМЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

**Бухоро– 2021**



**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ШАФИЕВ ТУРСУН РУСТАМОВИЧ**

**ЗАРАРЛИ МОДДАЛАРНИНГ АТМОСФЕРАДА КЎЧИШИ ВА**  
**ДИФФУЗИЯ ЖАРАЁНИНИ МОНИТОРИНГ ВА БАШОРАТЛАШ**  
**УЧУН ЧИЗИҚСИЗ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРНИ, ҲИСОБЛАШ**  
**АЛГОРИТМЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.3.PhD/T1119 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Бухоро давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) ва «Ziyouet» Ахборот таълим порталида ([www.ziyouet.uz](http://www.ziyouet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:** **Равшанов Нормакмад**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Садуллаева Шахло Азимбаевна**  
техника фанлари доктори, доцент

**Тургунов Абдоржон Махаматсолневич**  
техника фанлари бўйича фалсафа доктори

**Етакчи ташкилот:** **Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.T.07.01 Илмий кенгашнинг 2021 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz) Тошкент ахборот технологиялари университети).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган.). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ кунини тарқатилди.  
(2021 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**Р.Ҳ. Ҳамдамов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
раиси, техника фанлари доктори, профессор

**Ф.М. Нуралиев**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
илмий котиби, техника фанлар доктори, доцент

**Ш.А. Садуллаева**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
қошидаги илмий семинар раиси  
физика-математика фанлари доктори, доцент

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)**

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда атроф-муҳитни антропоген чиқиндиларнинг салбий таъсиридан ҳимоялаш бўйича қарорлар қабул қилишни қўллаб қувватлашга йўналтирилган математик моделлар, самарали сонли алгоритмлар ва дастурий мажмуалар ишлаб чиқиш масалаларига катта эътибор қаратилмоқда. Саноат ҳудудлари атмосферасида зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини мониторинг қилиш, қаралаётган ҳудуднинг ифлосланиш фон даражаси, об-ҳаво ва иқлимий шароитлари ҳамда орографик характеристикаларини ҳисобга олган ҳолда атмосфера ҳавосида зарарли моддалар концентрациясининг тарқалишини баҳолаш ва башоратлаш масалалари назарий ва амалий жиҳатдан муҳим аҳамият касб этади. Шу сабабли, дунёнинг саноати ривожланган АҚШ, Германия, Франция, Хитой, Ҳиндистон, Россия Федерацияси ва бошқа мамлакатларида атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини мониторинг қилиш ва башоратлаш муаммолари доимий равишда муҳим аҳамият касб этиб келмоқда.

Дунёнинг етакчи илмий мактаблари зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнлари қонуниятларини тадқиқ қилиш учун математик моделлар ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш соҳасида илмий изланишлар олиб боришмоқда. Ушбу тадқиқот ишларида жараёнга таъсир этувчи асосий омиллар, хусусан ҳаво оқимининг тезлиги, атроф-муҳит ҳарорати, заррачаларнинг физик-механик хусусиятларини инобатга олган ҳолда кўчиш тезликлари, шамол таъсирида тупроқ эрозияси, қаралаётган ҳудуднинг об-ҳаво ва иқлим шароитлари каби омилларнинг таъсири ўрганилмоқда.

Ўзбекистон Республикасида атмосферанинг табиий ҳамда антропоген манбалар томонидан ифлосланиши оқибатида мавжуд экотизимларнинг экологик мувозанати бузилишини олдини олиш бўйича кенг қўламли чоратadbирлар олиб борилмоқда. Хусусан, 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «... одамларнинг экологик хавфсиз муҳитда яшашини таъминлаш, ... атроф-табиий муҳит, аҳоли саломатлиги ва генофондига зиён етказадиган экологик муаммоларни олдини олиш, ... ҳудудларда юзага келган экологик муаммоларни ҳал этишнинг таъсирчан механизмларини яратиш, ... табиий, техноген ва экологик характердаги фавқулодда вазиятлар эҳтимолини мониторинг ва прогностлаштиришнинг ягона тизимини ишлаб чиқиш»<sup>1</sup> каби вазифаларнинг қўйилиши, давлатимиз томонидан экология ва атроф-муҳит ҳимоясига муҳим эътибор қаратилганидан далолат беради. Бугунги кунда юқорида келтирилган вазифаларни амалга ошириш учун зарарли моддаларнинг тарқалишида жараёнга таъсир этувчи турли омилларни инобатга олган ҳолда ифодаланувчи адекват математик моделлар, экологик

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги № ПФ - 4947 - сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги фармони

юкломани баҳолаш ва башорат қилишнинг самарали ҳисоблаш алгоритмлари, шунингдек атроф-муҳитни муҳофаза қилишга йўналтирилган бошқарув қарорларини қабул қилишга қўмаклашувчи автоматлаштирилган тизимларсиз тасуввур қилиб бўлмайди.

Ушбу тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 21 апрелдаги ПФ-5024-сон «Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш соҳасида давлат бошқаруви тизимини такомиллаштириш тўғрисида»ги Фармони, 2018 йил 10 октябрдаги ПҚ-3956-сон «Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш соҳасида давлат бошқаруви тизимини такомиллаштириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги Қарори, шунингдек Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2018 йил 26 ноябрдаги 958-сон «Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш соҳасида илмий-тадқиқот базасини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарори ва бошқа ушбу соҳада қабул қилинган меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда назарда тутилган мақсад ва вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Ушбу тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналишига мос равишда бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Атмосферанинг чегара қатламида зарарли моддаларнинг қиска ва узоқ масофаларга кўчиши жараёнини математик моделлаштириш методологиясининг фундаментал жиҳатлари L.Thaning, E.Naslund, W.J.Layton, C.Berselli, J.M.Germano, H.Ferziger, J.Geiser, U.Piomelli, G.S.Winkelmanns, W.C.Reynolds, H.A.Фукс, О.И.Хинце, Г.И.Марчук, М.Е.Берлянд, Е.П.Медников, В.В.Пененко, В.М.Белолипецкая, М.В.Меньшов, В.И.Наац, В.К.Аргучинцев каби хорижий олимларнинг ишларида ёритилган.

Ўзбекистонда атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси масалаларини ечиш учун математик моделлар ва сонли алгоритмларни ишлаб чиқиш муаммолари билан Ф.Б.Абуталиев, С.К.Каримбердиева, М.Л.Арушанов, Н.Равшанов ва бошқа олимлар ишларида ўрганилган.

Кўп йиллик статистик маълумотлар ва олимлар томонидан ишлаб чиқилган математик моделларнинг тахлили шуни кўрсатадики, бугунги кунда атмосферадаги зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларининг кўп ўлчовли кўринишдаги математик моделлари, зарарли моддаларнинг физик-механик хусусиятларини инobatта олган ҳолда уларнинг тезликларининг вақтга нисбатан ўзгариши, қаралаётган ҳудуднинг орографияси ва иқлим омиллари, шунингдек вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аппроксимацияни қўллаш асосида самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш масалалари етарлича ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Бухоро давлат университети илмий

тадқиқот ишлари режасининг «Амалий математика ва ахборот технологиялари масалаларини математик моделлаштириш» (2017-2020) мавзусидаги тадқиқот ишлари ҳамда Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказининг БВ-Атех-2018-9 «Атмосфера ва сув ресурсларини техноген омилларидан ҳимоя қилиш масалаларини ечиш учун моделлар, тақсимланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар яратиш» (2018-2019) мавзусидаги лойиҳа доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** саноат ҳудудлари ҳаво ҳавзаларининг экологик ҳолатини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуани ишлаб чиқиш ҳамда такомиллаштиришдан иборат.

#### **Тадқиқотнинг вазифалари:**

атмосферада аэрозол заррачаларнинг тарқалиши жараёнини математик моделлаштириш муаммолари ҳолатини таҳлилдан ўтказиш ва уларнинг ечиш йўлларини излаш;

атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнига таъсир этувчи асосий омилларни, шу жумладан қаралаётган ҳудуднинг метеорологик шароитлари ва орографияси таъсирини тадқиқ қилиш;

заррачаларнинг физик-механик хусусиятларини ҳисоб олган ҳолда атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун чизикли ҳамда чизиксиз математик моделларни ишлаб чиқиш;

атмосферада ва ернинг устки қатламида ифлослантирувчи заррачалар концентрацияси майдонининг тақсимланишини баҳолаш ва башоратлаш масаласини ечиш учун самарали сонли алгоритмлар ишлаб чиқиш;

атроф-муҳитни муҳофаза қилиш тадбирларини амалга ошириш бўйича қарорларни қабул қилишни қўллаб қувватлашга йўналтирилган зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини таҳлил қилиш ва башоратлаш масалалари бўйича компьютерда ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун дастурий мажмуани ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** саноат объектлари ва табиий ифлослантирувчи манбалардан ташланаётган зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёни ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг предмети**ни математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютерда сонли ҳисоблашлар ўтказиш учун дастурий мажмуалар ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация тадқиқоти давомида ҳисоблаш математикаси, математик моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибалари усуллари, шунингдек дастурий мажмуалар ишлаб чиқиш учун объектга йўналтирилган дастурлаш технологиялари қўлланилган.

#### **Тадқиқотнинг илмий янгилиги:**

заррачаларнинг физик-механик хусусиятларини инобатга олган ҳолда атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини ифодаловчи чизикли уч ўлчовли математик модель ишлаб чиқилган;

атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини ифлослантирувчи заррачаларнинг ўзгарувчан кўчиш тезлиги, қаралаётган ҳудуднинг об-ҳаво ва иклим шароитлари ҳамда орографиясини инобатга олган ҳолда уч ўлчовли чизиқсиз математик модели ишлаб чиқилган;

атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси масалаларини ечиш учун юқори аниқликдаги ошқормас чекли айирмали схемага асосланган самарали сонли алгоритм ишлаб чиқилган;

атмосферада зарарли ташланмалар тарқалиши чизиқсиз масаласининг физик хусусиятларига мос қисмларга ажратиш усулига асосланган самарали сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:**

саноат ҳудудлари атмосферасига ташланаётган зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини ўрганиш, мониторинг қилиш ва башоратлаш учун математик аппарат ва дастурий мажмуа ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган дастурий мажмуа асосида Бухоро вилояти мисолида саноат ҳудудлари ҳаво ҳавзасининг экологик ҳолатини таҳлил қилиш ва башоратлаш учун сонли ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган;

ишлаб чиқилган дастурий мажмуа саноат, ишлаб чиқариш объектлари атмосферасини мониторинг қилиш ва башоратлаш ёрдамида табиат ва атроф-муҳитнинг химоясига қаратилган табиатни муҳофаза қилиш тадбирлари ва ишлаб чиқариш фаолияти давомида атмосфера ҳавосида санитария меъёрлари бузилган ҳолда тўланадиган жарималарни тўлаш учун молиявий ҳаражатларни тежашга доир бошқарув қарорларини қабул қилишда ёрдам берган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончилиги зарарли моддаларнинг атмосферада тарқалиши тенгламаси ва унинг чегаравий шартлари масса ва импульснинг кўчиши ва сакланиши қонунларига қатъий риоя қилиб шакллантирилгани билан изоҳланади. Сонли усуллардан фойдаланилганида аппроксимация аниқлиги ва ҳисоблаш жараёнининг яқинлашиш ва турғунлик шартлари етарли даражада таъминланган, олинган сонли натижалар табиат қонунларига зид эмас.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнининг янги математик моделларини иклим омилларининг ўзгаришлари, турбулентлик ва ютилиш коэффициентлари, қаралаётган ҳудудларнинг орографияси ҳамда зарарли моддаларнинг физик ва механик хусусиятларига боғлиқ равишда уларнинг тезлиги ўзгарувчанлигини инобатга олинган ҳолда ишлаб чиқилганлиги, шунингдек, юқори тартибли аппроксимациялашда вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан физик омиллар бўйича мос қисмларга ажратиш ҳамда чекли айирмали усуллар асосида самарали сонли алгоритмлар ишлаб чиқилганлигидан иборатдир.

**Диссертация тадқиқотининг амалий аҳамияти** зарарли моддалар атмосферанинг чегара қатламида тарқалиши жараёнларини кузатиш ва башоратлаш, табиий ва сунъий манбалар томонидан атмосферага ташланаётган зарарли моддаларнинг атроф-муҳитга салбий таъсирини таҳлил



килиш ва юзага келиши мумкин бўлган экологик хавфни камайтириш бўйича бошқарув қарорларини қабул қилишни қўллаб-қувватлаш учун дастурий мажмуани ишлаб чиқишда ўз аксини топган.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Саноат объектлари ҳудудлари атмосфераси ҳаво ҳавзаларининг экологик ҳолатини мониторинг қилиш ва башоратлашнинг математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаси асосида:

атмосферага ташланаётган зарарли моддаларнинг вақтга нисбатан ифлослантирувчи заррачаларининг ўзгарувчан тезликларини ҳисобга олган ҳолда уларнинг атмосфера ҳавосида тарқалиши жараёнини мониторинг қилиш ва башоратлаш, шунингдек, янги барпо этилаётган саноат объектларининг оптимал жойлаштирилиши билан боғлиқ қарорларни қабул қилишни қўллаб қувватлаш учун математик модель ва дастурий мажмуа Бухоро вилояти Экология ва табиатни муҳофаза қилиш бошқармаси фаолиятига жорий қилинган (Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитаси маълумотнома № 02-02/8-2738-сон, 19.11.2020 й.). Жорий қилиш натижасида атроф-муҳитнинг ҳимоясига қаратилган табиатни муҳофаза қилиш чора-тадбирларини амалга ошириш, атмосфера ҳавосида максимал руҳсат этилган концентрация меъёрлари бузилганлиги ҳақида ўз вақтида огоҳлантириш ҳисобига тўланадиган жарималарни тўлаш билан боғлиқ молиявий харажатларни тежаш бўйича тавсиялар ишлаб чиқиш имконини берган;

зарарли моддаларнинг атмосфера ҳавосида кўчиши ва диффузияси жараёнини таҳлил қилиш, кузатиш ва башоратлаш бўйича математик ва дастурий мажмуа Бухоро вилояти «МКМК-409» МЧЖ фаолиятига жорий қилинган (Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитаси маълумотнома № 02-02/8-2738-сон, 19.11.2020 й.). Жорий қилиш натижасида ноқулай метеорологик шароитларда ва объектнинг белгиланган ишлаш режимида зарарли моддаларнинг ишлаб чиқариш объекти ҳудудларида зарарли газлар, чанг ва канцероген моддалар концентрациясини башоратлаш аниқлиги 9-11% га оширилган;

заррачаларнинг тезлиги ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда атмосфера ҳавосида зарарли моддалар кўчиши ва диффузияси жараёнлари таҳлил қилиш, кузатиш ва башоратлаш бўйича математик ва дастурий мажмуаси “CHORI MEGA MONTAJ” МЧЖ фаолиятига жорий қилинган (Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитаси маълумотнома № 02-02/8-2738-сон, 19.11.2020 й.). Жорий қилиш натижасида атмосферанинг чегара қатламида ва ер юзаси сатҳида цемент, чанг, кум ҳамда қозонхоналарда ёқиладиган углеводород ёқилгиси ёқилиши натижасида ҳосил бўладиган зарарли моддалар концентрациясини башоратлаш аниқлигини 8-10% га оширилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур диссертация иши натижалари 7 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича 25 та илмий иш чоп этилган, Ўзбекистон Республикаси Олий

аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 11 та илмий мақола, жумладан 4 та хорижий ва 7 та республика журналларида нашр қилинган, шунингдек 3 та ЭХМ учун яратилган дастурий маҳсулотларини қайд этиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 118 саҳифани ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос равишда долзарблиги ва зарурияти асосланган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объекти ва предмети кўрсатилган, унинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, назарий ва амалий аҳамиятлари очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий этиш ҳолатлари, шунингдек, тадқиқот натижаларининг чоп этилганлиги ҳамда диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Зарarli моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларини математик моделлаштириш ҳолати муаммолари ва унинг ечимлари» деб номланган биринчи боби тўртта параграфдан иборатдир.

Биринчи параграфда атмосферанинг зарarli моддалар билан ифлосланиш манбалари, тавсифлари ва классификацияси келтирилган. Иккинчи параграфда атмосферада зарarli моддаларнинг тарқалиши жараёнини математик моделлаштириш усуллари ўрганилган. Учинчи параграфда атмосферанинг зарarli моддалар билан ифлосланиши жараёнининг математик моделлари тахлили келтирилган. Бобнинг тўртинчи параграфида ушбу муаммо бўйича илмий манбаларни батафсил тахлил қилиш асосида тадқиқот мақсади ва вазифалар белгиланган.

Диссертация ишининг «Зарarli моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун математик моделлар» деб номланган иккинчи бобида атмосферада зарarli моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини тадқиқ қилиш учун математик моделлар ишлаб чиқишга бағишланган.

Бошқа муаллифларнинг кўплаб тадқиқотларида зарarli моддаларнинг атмосферада тарқалиш жараёнини моделлаштиришда заррачаларнинг вақтга нисбатан ўзгарувчан тезликлари атмосфера ҳаво массасининг тезлигига тенглаштирилиб, ўзгармас катталиқ деб қаралган. Мазкур ишда ушбу омил ўзгарувчан катталиқ эканлиги ва у атмосферада зарarli моддалар тарқалиши жараёнининг муҳим параметри сифатида кўриб чиқилган.

Зарarli моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнида зарarli моддалар заррачаларининг йўналишларга мос тезликлари асосан

шамол тезлигига боғлиқ равишда ўзгаради. Демак, шамол таъсири турли хилдаги, яъни турли физик-механик хусусиятга эга бўлган заррача учун турлича таъсир этади. Ушбу кучнинг таъсирида заррачаларнинг тезликлари уларнинг физик-механик хусусиятлари асосида шаклланади. Зарarli моддалар заррачаларининг атмосфера ҳавосидаги ҳаракати уларнинг физик-механик хусусиятидан келиб чиққан ҳолда ҳар бир заррача тури учун ҳаракат траекторияси турлича бўлади.

Келтирилган тахминларни ҳисобга олган ҳолда, маскур ишда қаралаётган заррачаларининг  $u, v, w$  йўналишлар бўйича тезликларини инобатга олган ҳолда гидромеханикнинг қонуни асосида ифодаланувчи кўп ўлчовли хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламалар ёрдамида атмосферада зарarli моддаларнинг кўчиш ва диффузияси жараёнларини куйидагича математик модели таклиф этилди:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} + \sigma \theta = \mu \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \delta Q; \quad (1)$$

$$m \frac{du_x}{dt} = 3\pi\eta d(u - u_x); \quad (2)$$

$$m \frac{dv_x}{dt} = 3\pi\eta d(v - v_x); \quad (3)$$

$$m \frac{dw_x}{dt} = 3\pi\eta d(w - w_x) - mg \quad (4)$$

мос равишда бошланғич ва чегаравий шартлар:

$$\theta|_{z=0} = \theta^0; \quad u_x|_{z=0} = u_x^0; \quad v_x|_{z=0} = v_x^0; \quad w_x|_{z=0} = w_x^0; \quad (5)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_s - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_s - \theta); \quad (6)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_s - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_s - \theta); \quad (7)$$

$$-\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \beta \theta; \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi(\theta_s - \theta). \quad (8)$$

Бу ерда  $\theta$  - зарarli моддалар концентрацияси;  $u, v, w$  - зарarli моддаларнинг йўналишлар бўйича тезликларини ташкил этувчилари;  $u, v, w$  - шамолнинг йўналишлар бўйича тезликлари;  $d$  - заррачанинг диаметри;  $m$  - заррачанинг оғирлиги;  $\eta$  - динамик ёпишқоқлик коэффициенти;  $\theta^0$  - атмосфера ҳавосидаги зарarli моддаларнинг бошланғич концентрацияси;  $\sigma$  - атмосферадаги зарarli моддаларнинг ютилиш коэффициенти;  $\delta$  - Дирак функцияси;  $g$  - эркин тушиш тезланиши;  $\mu$  - диффузия коэффициенти;  $\beta$  - ер сатҳи билан таъсирлашиш коэффициенти;  $Q$  - манбаларнинг қуввати;  $\kappa$  - турбулентлик коэффициенти;  $\xi$  - ҳисоб чегараси орқали ташқи муҳит билан масса алмашинув коэффициенти;  $\theta_s$  - масала ечими соҳасидан ташқаридаги зарarli моддаларнинг концентрацияси.

Шуни таъкидлаш керакки, (1)-(4) масалаларнинг қўйилишида ва уларга тегишли (5)-(8) бошланғич ва чегаравий шартлар асосида атмосферада ҳаво оқими таъсири натижасида зарарли моддаларнинг конвектив кўчиши, молекуляр ва турбулент диффузия ҳисобига атмосферада зарарли моддаларнинг тарқалиши, шунингдек, атмосфера ҳавосидаги намлик ҳисобига зарарли моддаларнинг ютилиши каби физик жараёнларни кўришимиз мумкин.

Зарраларнинг йўналишлар бўйича тезлигини аниқлашда атмосфера ҳавосида ҳаракатланаётган заррага таъсир этувчи унинг физик-механик хусусиятлари: оғирлиги, диаметри, ҳавонинг динамик ёпишқоқлиги ҳисобга олинган.

Шамолнинг юқори тезликларида зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини ифодалашда қаралаётган ҳудуднинг орографияси, заррача зичлиги, атроф-муҳит ҳароратига боғлиқ равишда ўзгарувчи ҳавонинг зичлиги ва динамик ёпишқоқлик коэффициенти, эркин тушиш тезланиши, қаршилиқ кучи учун жисм шакли коэффициенти, радиуси ва ҳаво оқимининг кўтариш кучини ҳисобга олган ҳолда масаланинг уч ўлчовли қўйилишдаги физиксиз математик модели ишлаб чиқилди:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} + v_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} + w_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} + \sigma h\theta = \mu \left( \frac{\partial^2 (h\theta)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (h\theta)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \right) + \delta Q; \quad (9)$$

$$m \frac{du_*}{dt} = c_f \pi r^2 \rho_* (u_* - U)^2; \quad (10)$$

$$m \frac{dv_*}{dt} = c_f \pi r^2 \rho_* (v_* - U)^2; \quad (11)$$

$$m \frac{dw_*}{dt} = -\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_* - \rho_e) g - k_f \mu_* \pi r w_* + F_n \quad (12)$$

бошланғич

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad u_*|_{t=0} = u_*^0; \quad v_*|_{t=0} = v_*^0; \quad w_*|_{t=0} = w_*^0 \quad (13)$$

ва чегаравий шартлар

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta); \quad (14)$$

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} \right|_{y=0} = \xi h (\theta_* - \theta); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = \xi h (\theta_* - \theta); \quad (15)$$

$$-\kappa \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \right|_{z=0} = \xi h (\beta \theta - Q_0); \quad \kappa \left. \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \right|_{z=H} = \xi h (\theta_* - \theta). \quad (16)$$

Бу ерда  $U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  - ҳаво оқимининг тезлиги;  $c_f$  - заррачаларнинг ҳаво оқимига қаршилиги коэффициенти;  $r$  - заррача радиуси;  $\rho_e$  - ҳавонинг зичлиги;  $\rho_*$  - қаралаётган заррачанинг зичлиги;  $k_f$  - қаршилиқ кучи учун жисм шакли коэффициенти;  $\mu_*$  - ҳавонинг динамик ёпишқоқлик коэффициенти;  $F_n$  - ҳаво оқимининг кўтариш кучи;  $h$  - ҳудуд орографияси;  $Q_0$  - ер сатҳидан кўтарилган заррачалар микдори;

(10)-(12) тенгламалар заррачаларнинг вақт бўйича ўзгарувчан горизонтал ва вертикал тезликларини ифода этади. Заррачалар тезликларини ифода

этишда қаралаётган заррачанинг физик-механик хусусиятлари – унинг массаси, ҳаво оқимиға қаршилиғи, радиуси, атроф-муҳит ҳароратига боғлиқ равишда ўзгарувчан ҳавонинг зичлиғи каби параметрлар инобатта олинган. Шунингдек, ҳаво оқимининг кучини заррачаларға таъсирини инобатта олиш учун, ҳаво оқимининг тезлиғи ҳам инобатта олинган.

(9)–(16) масалани (10)–(12) тенгламаларида заррачаларнинг горизонтал ва вертикал тезликлари таҳлил қилинган ишлардан фарқли равишда чизиксиз кўринишда ифодаланган.

Ушбу бобнинг охири параграфида ишлаб чиқилган зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини ифодаловчи чизиксиз математик модель асосида ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун, масалани физик мос хусусиятларға ажратилиб, масалани ечиш жараёни соддалаштирилган.

(9)-(16) масалани сонли ечиш учун изланаётган ечимни бутун фазода силлиқ функция сифатида қабул қиланади. Атмосферада массаларнинг  $t_n \leq t \leq t_{n+1}$  кичик вақт интервалида турли физикавий жараён: кўчиш, диффузия ва ютилишининг аддитивлигидан фойдаланган ҳолда, улар алоҳида масалалар деб қаралган.

Зарарли моддалар аралашмасининг йўналиш бўйича кўчиши жараёнини (А) масала сифатида қаралади:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + u_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} + v_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial y} + w_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} = \frac{1}{3} \delta Q; \quad (17)$$

$$m \frac{du_*}{dt} = c_p \pi r^2 \rho_* (u_* - U)^2; \quad (18)$$

$$m \frac{dv_*}{dt} = c_p \pi r^2 \rho_* (v_* - U)^2; \quad (19)$$

$$m \frac{dw_*}{dt} = -\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_* - \rho_*) g - k_p \mu_* \pi r w_* + F_n \quad (20)$$

бошланғич

$$\theta_1|_{t=0} = \theta_1^0; \quad u_*|_{t=0} = u_*^0; \quad v_*|_{t=0} = v_*^0; \quad w_*|_{t=0} = w_*^0 \quad (21)$$

ва чегаравий шартлар

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad (22)$$

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad (23)$$

$$-\kappa \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} \right|_{z=0} = \xi h (\beta \theta_1 - Q_0); \quad \kappa \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} \right|_{z=H} = \xi h (\theta_* - \theta_1). \quad (24)$$

Атмосферада зарарли моддаларнинг диффузияси жараёнини (Б) масала сифатида қаралади:

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial^2 (h\theta_2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (h\theta_2)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial z} \right) + \frac{1}{3} \delta Q; \quad (25)$$

мос бошланғич

$$\theta_2^0 = \theta_1^{n+1} \quad (26)$$

чегаравий шартлар

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi h(\theta_* - \theta_2); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi h(\theta_* - \theta_2); \quad (27)$$

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi h(\theta_* - \theta_2); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi h(\theta_* - \theta_2); \quad (28)$$

$$-\kappa \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \xi h(\beta\theta_2 - Q_0); \quad \kappa \frac{\partial(h\theta_2)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi h(\theta_* - \theta_2). \quad (29)$$

Заррачаларнинг ҳаво массасида ютилиши жараёнини (В) масала сифатида қаралади:

$$\frac{\partial\theta_3}{\partial t} + \sigma h\theta_3 = \frac{1}{3} \delta Q; \quad (30)$$

мос равишда бошланғич

$$\theta_3^0 = \theta_2^{n+1} \quad (31)$$

ва чегаравий шартлар

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad (32)$$

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad (33)$$

$$-\kappa \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \xi h(\beta\theta_3 - Q_0); \quad \kappa \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi h(\theta_* - \theta_3). \quad (34)$$

Шундай қилиб, қўйилган қўп ўлчовли физиксиз масала (9)-(16) ни ечиш учун масалани физик хусусиятларга мос қисмларга – (17) - (24), (25) - (29) ва (30) – (34) масалалар ажратиб чиқилди ва бу масалаларни кетма-кет бир бирига боғлиқ бўлмаган ҳолда чекли айирмалли усул ёрдамида ечиш мумкин.

Бобнинг якунида асосий хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг учинчи боби «Зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларини мониторинг қилиш ва башоратлаш масалаларининг сонли алгоритмлари» иккинчи бобда ишлаб чиқилган масалаларни ечишнинг самарали сонли алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

(1)-(8) масала уч ўлчовли дифференциал тенгламалар ва уларга мос равишда бошланғич ва чегаравий шарт билан берилганли сабабли, уни аналитик усулда ечиш мураккаблик келтириб чиқаради. (1)-(8) масалани ечиш учун сонли усуллардан фойдаланилди, яъни  $D = \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq t \leq T\}$  соҳага тўр қиритилди ва бу ерда  $T$  – ўрганилаётган вақт оралиғидаги максимал вақт,  $[0, L_x]$ ,  $[0, L_y]$  ва  $[0, L_z]$  интервалларни  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  қадамлар билан,  $[0, T]$  вақт оралиғини  $\Delta t$  билан бўлинди. Натижада,  $\Omega_{\text{son}}$  ҳисоблаш тўрига эга бўламиз:

$$\Omega_{\text{son}} = \left\{ \left( x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n\Delta t \right); \right.$$

$$\left. i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}, k = \overline{1, L}, n = \overline{0, N_t}, \Delta t = \frac{T}{N_t} \right\}.$$

Уч ўлчовли (1)-(8) масалани ечиш учун ошкормас чекли айирмали схемадан фойдаланиланиди ва (1) тенглама  $Ox$  йўналиш бўйлаб қуйидаги тарзда аппроксимация қилинади:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta t / 3} + u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} + v_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta y} + w_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta z} \\ & + \sigma \theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \mu \frac{\theta_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 2\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \theta_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x^2} + \mu \frac{\theta_{i,j-1,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j+1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{\kappa_{z-0.5}\theta_{i,j,k-1}^n - (\kappa_{z-0.5} + \kappa_{z+0.5})\theta_{i,j,k}^n + \kappa_{z+0.5}\theta_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3}\delta_{i,j,k}Q; \end{aligned} \quad (35)$$

Ўхшаш ҳадларни ихчамлаб, соддалаштиргандан кейин (35) тенгламани уч диагоналли чизикли алгебраик тенгламалар системаси кўринишида ёзиш мумкин:

$$a_{i,j,k}\theta_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{i,j,k}\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{i,j,k}\theta_{i,j,k+1}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{i,j,k},$$

бунда тенгламанинг коэффициентлари ва озод ҳади қуйидаги ифодалар ёрдамида аниқланади:

$$\begin{aligned} a_{i,j,k} &= \frac{\mu}{\Delta x^2}; \quad b_{i,j,k} = \frac{3}{\Delta t} - \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} + \frac{2\mu}{\Delta x^2} + \sigma; \quad c_{i,j,k} = \frac{\mu}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x}; \\ d_{i,j,k} &= -\left(\frac{3}{\Delta t}\theta_{i,j,k}^n - \frac{v_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta y}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{v_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta y}\theta_{i,j,k}^n - \frac{w_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta z}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{w_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta z}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j-1,k}^n - \right. \\ & \left. - \frac{2\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{\kappa_{z-0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k-1}^n - \frac{\kappa_{z-0.5} + \kappa_{z+0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\kappa_{z+0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3}\delta_{i,j,k}Q\right). \end{aligned}$$

Чегаравий (4) шартларни иккинчи тартибли аниқликдаги чекли айирмаларга алмаштирилиб, ҳайдаш коэффициентлари ва зарарли моддаларнинг чегарадаги қийматини ҳисоблаш формулалари олинади:

$$\begin{aligned} \alpha_{o,i,k} &= \frac{b_{i,j,k}\mu - 4\mu c_i}{a_{i,j,k}\mu - 2\Delta x\xi c_{i,j,k} - 3\mu c_{i,j,k}}; \quad \beta_{o,i,k} = \frac{-2\Delta x\xi\theta_{o,i,j,k} - d_{i,j,k}\mu}{a_{i,j,k}\mu - 2\Delta x\xi c_{i,j,k} - 3\mu c_{i,j,k}}; \\ \theta_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} &= \frac{2\Delta x\xi\theta_o - \beta_{N-2,j,k}\mu - \alpha_{N-2,j,k}\beta_{N-1,j,k}\mu + 4\beta_{N-1,j,k}\mu}{\alpha_{N-2,j,k}\alpha_{N-1,j,k}\mu - 4\alpha_{N-1,j,k}\mu + 2\Delta x\xi + 3\mu}. \end{aligned}$$

Юқорида бажарилган технологияларни  $Oy$  ва  $Oz$  йўналишлари учун ҳам такрорланади.

(2)-(4) тенгламани ошкормас схемадан фойдаланган ҳолда чекли айирмали схемага ўтиб,  $u_{i,j,k}$ ,  $v_{i,j,k}$ ,  $w_{i,j,k}$  ни қийматини ҳисоблаш учун ҳар бир йўналиш бўйича қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$Ox$  бўйича:

$$u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{m u_i^n + \Delta t \pi \eta du}{m + \Delta t \pi \eta d}; \quad v_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{m v_i^n + \Delta t \pi \eta dv}{m + \Delta t \pi \eta d}; \quad w_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{m w_i^n + \Delta t \pi \eta dw - mg \Delta t / 3}{m + \Delta t \pi \eta d}.$$

$Oy$  ва  $Oz$  йўналишлари бўйича худди шу тартибда  $u_{i,j,k}$ ,  $v_{i,j,k}$ ,  $w_{i,j,k}$  ни қийматлари топилади.

(9)-(16) кўп ўлчовли чизиксиз масалани ечиш учун иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли айирмали схемадан фойдаланилди. (9)-(16) масалани ечишдан олдин, заррачаларнинг  $x, y, z$  ўқлари бўйича ҳаракатларини ташкил этувчи  $u, v, w$ , тезликлари (10)-(12) ни ошқормас схемадан фойдаланган ҳолда қуйидаги кўринишда ҳисобланади,

Ох бўйича:

$$u_v^{n+\frac{1}{3}} = \frac{3m}{3m - 2c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{u} \Delta t + 2c_f \pi r^2 \rho_s U \Delta t} u_v^n - \frac{c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{u}^2 \Delta t + c_f \pi r^2 \rho_s U^2 \Delta t}{3m - 2c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{u} \Delta t + 2c_f \pi r^2 \rho_s U \Delta t};$$

$$v_v^{n+\frac{1}{3}} = \frac{3m}{3m - 2c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{v} \Delta t + 2c_f \pi r^2 \rho_s U \Delta t} v_v^n - \frac{c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{v}^2 \Delta t + c_f \pi r^2 \rho_s U^2 \Delta t}{3m - 2c_f \pi r^2 \rho_s \ddot{v} \Delta t + 2c_f \pi r^2 \rho_s U \Delta t};$$

$$w_v^{n+\frac{1}{3}} = \frac{9m}{9m + 3k_f \mu_s \pi r \Delta t} w_v^n - \frac{4\pi r^3 (\rho_s - \rho_e) g \Delta t - 3F_n \Delta t}{9m + 3k_f \mu_s \pi r \Delta t}.$$

Оу ва Оz йўналишлари бўйича худди шу тартибда  $u, v, w$  ни қийматлари топилади.

Сўнгра, (9) тенглама ва унинг чегаравий шартлари (14), (15), (16) лар Ох, Оу, Оz йўналишлари бўйича вақт ва фазовий ўзгарувчилар бўйича иккинчи тартибда аниқликда аппроксимацияланади. Натижада, ҳайдаш усули билан ечилинадиган чизикли алгебраик тенгламалар системаси олинади.

Итерацион жараёнининг яқинлашувчанлиги:

$$\left| u_v^{(s+1)} - u_v^{(s)} \right| < \varepsilon; \left| v_v^{(s+1)} - v_v^{(s)} \right| < \varepsilon; \left| w_v^{(s+1)} - w_v^{(s)} \right| < \varepsilon;$$

шарт ёрдамида текширилади ва бу ерда  $\varepsilon$  - талаб қилинаётган ечимнинг аниқлиги,  $s$  - итерациялар сони. Дастлабки итерация қиймати олдинги қатламдаги ечимга тенг деб олинади.

Умуман олганда барча ишлаб чиқилган алгоритмлар дала тажриба кўрсаткичлари билан етарли мосликни кўрсатди.

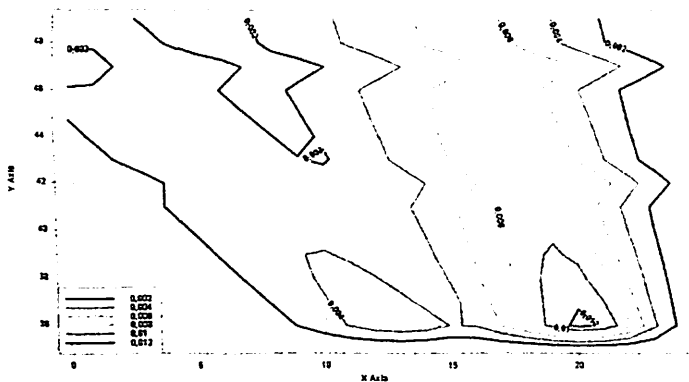
Диссертациянинг тўртинчи «Зарarli моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузия жараёнларини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун дастурий мажмуа яратиш» бобида ишлаб чиқилган математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари асосида ишлаб чиқариш объектлари худудларининг ҳаво хавзаларини мониторинг қилиш ва башоратлаш масалалари учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилган. Дастурий мажмуа Microsoft Visual Studio дастурлаш муҳити C# дастурлаш тилида яратилган. Ҳисоблаш тажрибалари натижаларини график кўринишда визуаллаштириш ILNumerics кутубхонасидан фойдаланилди.

Ишлаб чиқилган дастурий мажмуа қуйидаги дастурий модуллардан иборат:

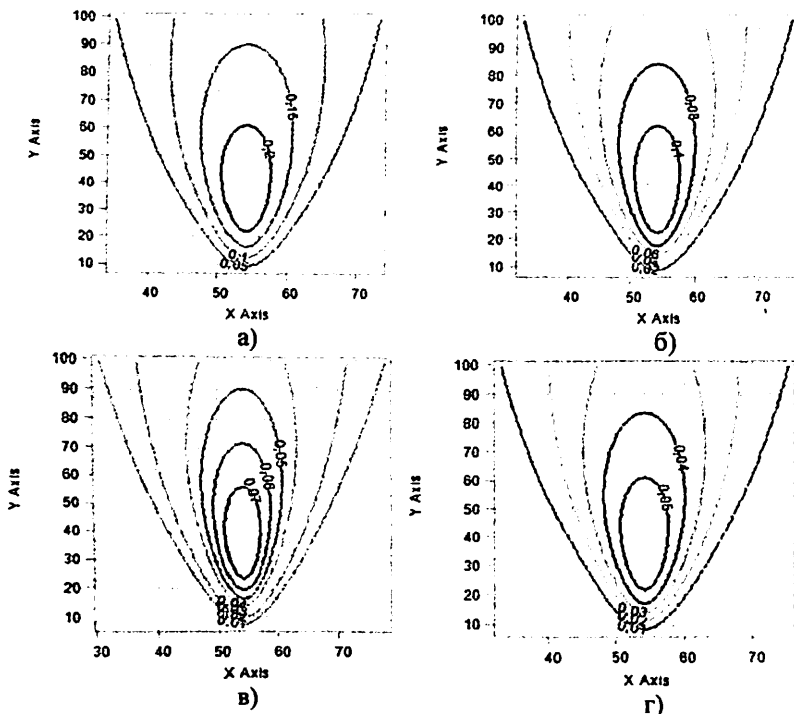
- «PSV-Calс» модули зарarli моддалар заррачаларининг тезликларини дифференциал тенгламалар билан ифодаланувчи чизикли ёки чизиксиз кўринишини таълаб, уларнинг тезликларини аниқлаш имконини беради;



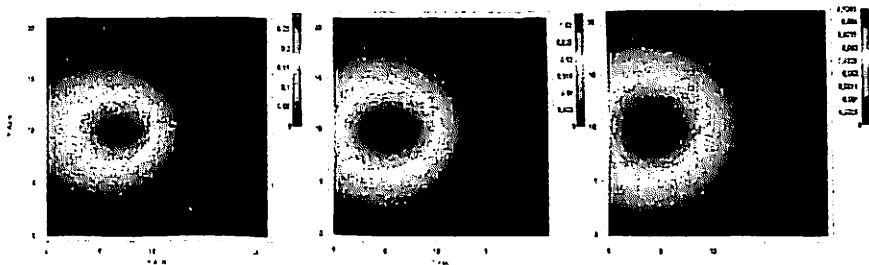




2-расм. Атмосферада зарарли моддаларнинг қўчиши ва диффузияси жараёнини тадқиқ қилиш учун қаралаётган ҳудуд орографиясини инobatга олган ҳолда ҳисоблаш тажрибалари натижаси ( $z=10\text{ м}$ )



3 – расм. Олтингурт оксиди (IV) зарарли моддасининг атмосферада қўчиши ва диффузияси жараёнини шамолнинг турли тезликларида визуализация қилиш ( $PЭМҚ=0,05\text{ мг/м}^3$ ).



*a)  $z=300$  м;*

*б)  $z=400$  м;*

*в)  $z=500$  м;*

**4 – расм. Азот оксиди зарарли моддасининг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини визуализация қилиш**

Ишлаб чиқилган математик таъминот ва дастурий мажмуа асосида олинган натижалар Ўзбекистон Республикаси Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитасининг тегишли таркибий бўлинмаларида фойдаланилиши мумкин.

## ХУЛОСА

«Зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини мониторинг ва башоратлаш учун чизиксиз математик моделларни, ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидаги асосий натижалар олинган:

1. Зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини математик моделлаштириш усулларига бағишланган илмий тадқиқот ишлари таҳлил қилинди.

2. Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун атмосферага ташланаётган заррачаларнинг физик-механик хусусиятларини инобатта олувчи уч ўлчовли математик модель ишлаб чиқилди;

3. Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини заррачаларнинг физик-механик хусусиятлари ҳамда қаралаётган ҳудуднинг орографиясини инобатта олган ҳолда мониторинг қилиш ва башоратлаш учун уч ўлчовли чизиксиз математик модель ишлаб чиқилди;

4. Зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузиясининг уч ўлчовли масалаларини ечиш учун вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан иккинчи тартибли аппроксимация аниқлигини таъминловчи ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

5. Атмосферанинг чегара қатламида зарарли моддаларнинг концентрация майдонини физик омиллар бўйича ажратиш усули асосида вақт ва фазовий ўзгарувчилар бўйича ошкормас чекли-айирмалар схемасига асосланган иккинчи тартибли аппроксимацияни қўллаган ҳолда баҳолаш ва башоратлаш масалаларини ечиш учун сонли алгоритм ишлаб чиқилди.

6. Ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари асосида зарарли моддаларнинг атмосферада тарқалиши жараёнига таъсир этадиган асосий омиллар аниқланди. Хусусан, метеорологик (шамолнинг тезлиги ва йўналиши, атроф-муҳитнинг ҳарорати ва намлиги), қаралаётган ҳудуднинг орографияси, зарарли моддаларнинг физик-механик хусусиятлари каби омилларнинг таъсири аниқланди.

7. Диссертация ишининг натижалари Бухоро вилоятидаги саноат объектларида қўлланилиши натижасида ноорганик чанг зарралари ва ёниш маҳсулотларининг атмосфера чегара қатлами ва ернинг юза қисмидаги концентрацияси даражасини башорат қилиш тўғрилигини 8-11% га ошириш имкони берди. Ҳисоблаш тажрибалари натижалари тозалаш қурилмаларининг ўз вақтида таъмирланиши бўйича қарорлар қабул қилишни қўллаб қувватлашни таъминлаш ҳамда зарарли моддалар концентрациясининг санитар меъёри бузилиши билан алоқадор молиявий харажатларни 6-8% га камайтириш имконини берди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ШАФИЕВ ТУРСУН РУСТАМОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ В  
АТМОСФЕРЕ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

**Бухара – 2021**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2020.3.PhD/T1119.**

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Равшанов Нормаммад</b> доктор технических наук, профессор
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Садуллаева Шахло Азизбаевна</b> доктор технических наук, доцент <b>Тургунов Абдоржон Махаматсоленич</b> доктор философии по техническим наукам
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Национальный университет Узбекистана</b>

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_ часов на заседании научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Ташкентский университет информационных технологий. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер №\_\_). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.  
(реестр протокола рассылки №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.)

**Р.Х. Хамдамов**  
Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор

**Ф.М.Нуралиев**  
Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, доцент

**Ш.А. Садуллаева**  
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 большое внимание уделяется вопросам разработки математических моделей, эффективных численных алгоритмов и программных комплексов, ориентированных на поддержку принятия решений по защите окружающей среды от негативного влияния антропогенных выбросов. Особый теоретический и практический интерес вызывают задачи мониторинга процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере промышленных регионов, оценки и прогнозирования распределения концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе с учётом фонового загрязнения, погодноклиматических условий и орографических характеристик рассматриваемых территорий. В этой связи, в таких индустриально развитых странах мира как США, Германия, Франция, Китай, Индия, Российская Федерация и других, проблемы мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере неизменно являются актуальными.

В мире ведущие научные школы проводят исследования в области разработки математических моделей и вычислительных алгоритмов для изучения закономерностей процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере. В этих исследованиях рассматриваются основные факторы, действующие на процесс, в том числе, параметры интенсивности воздушных потоков, температура окружающей среды, скорость перемещения частиц с учетом их физико-механических свойств, ветровая эрозия, характерные погодноклиматические условия рассматриваемой местности.

В Республике Узбекистан предпринимаются широкомасштабные меры в целях предотвращения нарушений экологического баланса существующих экосистем, вызванных загрязнением атмосферы со стороны естественных и антропогенных источников. В частности, в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. определены такие задачи как «...обеспечение экологической безопасности проживания людей, ... предотвращение экологических проблем, наносящих урон состоянию окружающей среды, здоровью и генофонду населения, ... создание действенных механизмов решения экологических проблем, возникающих в регионах, ... разработка единой системы прогнозирования и мониторинга вероятности чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и экологического характера»<sup>1</sup>, что свидетельствует об особом внимании, уделяемом вопросам экологии и охраны окружающей среды. Реализацию вышеуказанных задач, сегодня, невозможно представить без разработки адекватных математических моделей процесса распространения вредных веществ в атмосфере с учетом различных факторов влияния, эффективных вычислительных алгоритмов оценки и прогнозирования экологической

---

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

нагрузки, а также автоматизированных систем, направленных на поддержку принятия управленческих решений по природоохранным мероприятиям.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению целей и задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 21 апреля 2017 года №УП-5024 «О совершенствовании системы государственного управления в сфере экологии и охраны окружающей среды», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 10 октября 2018 года №3956 «О дополнительных мерах по совершенствованию системы государственного управления в сфере экологии и охраны окружающей среды», Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 26 ноября 2018 года №958 «О мерах по дальнейшему развитию научно-исследовательской базы в сфере экологии и охраны окружающей среды» и другими нормативно-правовыми документами.

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

**Степень изученности проблемы.** Фундаментальные аспекты методологии математического моделирования процесса ближнего и дальнего транспорта загрязнителей в пограничном слое атмосферы нашли отражение в работах таких зарубежных ученых как L. Thaning, E. Naslund, W.J. Layton, C. Berselli, J.M. Germano, H. Ferziger, J. Geiser, U. Piomelli, G.S. Winckelmans, W.C. Reynolds, H.A. Фукс, О.И. Хинце, Г.И. Марчук, М.Е. Берлянд, Е.П. Медников, В.В. Пененко, В.М. Белолипецкая, М.В. Меньшов, В.И. Наац, В.К. Аргучинцев и других.

В Узбекистане проблемы разработки математических моделей и численных алгоритмов решения задач переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере изучались в работах Ф.Б. Абуталиева, С.К. Каримбердиевой, М.Л. Арушанова, Н. Равшанова и других ученых.

Анализ многолетних статистических данных и математических моделей, разработанных отмеченными учеными, показал, что в настоящее время недостаточно изучены вопросы разработки многомерных математических моделей процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом изменения скорости перемещения частиц вредных веществ, зависящей от их физико-механических свойств, орографии и климатических факторов рассматриваемой местности, а также вопросы разработки эффективных вычислительных алгоритмов на основе аппроксимации высокого порядка, относительно переменных по времени и пространству.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Бухарского государственного университета по теме «Математическое моделирование прикладной математики и информационных технологий» (2017-2020) и Научно-



инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми в рамках гранта №БВ-Атех-2018-9 «Разработка моделей, распределённых вычислительных алгоритмов и программных обеспечений для решений задач охраны атмосферы и водных ресурсов от техногенных факторов» (2018-2019).

**Целью исследования** является разработка и усовершенствование математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного комплекса для мониторинга и прогнозирования экологического состояния воздушных бассейнов промышленных регионов.

**Задачи исследования:**

проведение анализа состояния проблем математического моделирования процесса распространения аэрозольных частиц в атмосфере и поиск путей их решения;

исследование основных факторов, влияющих на процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, включая метеоусловия и орографию рассматриваемой местности;

разработка линейных и нелинейных математических моделей для мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом физико-механических свойств частиц;

разработка эффективных численных алгоритмов решения задач оценки и прогнозирования распределения полей концентрации частиц загрязнителей в атмосфере и на подстилающей поверхности;

разработка программного комплекса для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ по задачам анализа и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с поддержкой принятия решений, связанных с осуществлением природоохранных мероприятий.

**Объектом исследования** является процесс атмосферного переноса и диффузии вредных веществ, выбрасываемых промышленными объектами и естественными источниками загрязнения.

**Предмет исследования** – математические модели, вычислительные алгоритмы и программные комплексы для проведения численных расчетов на ЭВМ.

**Методы исследования.** В ходе диссертационного исследования применялись методы вычислительной математики, математического моделирования, вычислительного эксперимента, а также технологии объектно-ориентированного программирования для разработки программных комплексов.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

разработана линейная трехмерная математическая модель, описывающая процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом физико-механических свойств частиц;

разработана трехмерная нелинейная математическая модель процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом переменной

скорости перемещения загрязняющих частиц, погоднo-климатических и орографических характеристик рассматриваемой территории;

разработан эффективный численный алгоритм для решения задач переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, основанный на использовании неявной конечно-разностной схемы высокого порядка точности;

разработан эффективный численный алгоритм решения нелинейной задачи распространения вредных выбросов в атмосфере, основанный на методе расщепления задачи по физическим факторам;

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны математический аппарат и программный комплекс для исследования, мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии выбросов вредных частиц в атмосфере промышленных регионов.

на основе разработанного программного комплекса были проведены численные расчеты по анализу и прогнозированию экологического состояния воздушного бассейна промышленных территорий на примере Бухарской области;

разработанный программный комплекс обеспечил поддержку принятия управленческих решений по мероприятиям, направленных на защиту окружающей среды прилегающих территорий при экономии финансовых затрат на оплату штрафов за нарушения санитарных норм, допущенных в процессе производственной деятельности.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается тем, что уравнения, описывающие процесс распространения загрязняющих частиц в атмосфере, и их краевые условия сформулированы в строгом соответствии с законами сохранения и переноса массы и импульса. При использовании численных методов обеспечены необходимые точности аппроксимации, устойчивость и сходимостъ вычислительного процесса, а результаты расчётов не противоречат законам природы.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в разработке новых математических моделей процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом динамического изменения скорости перемещения загрязняющих частиц в зависимости от их физико-механических свойств, погоднo-климатических и орографических характеристик рассматриваемых территорий, а также в разработке эффективных численных алгоритмов на основе методов конечных-разностей и расщепления по физическим факторам, обладающих высоким порядком аппроксимации по времени и пространственным переменным.

**Практическая значимость диссертационного исследования** нашла отражение в разработке программного комплекса для решения экологических задач мониторинга и прогнозирования процесса распространения вредных выбросов в нижних слоях атмосферы, анализа негативного влияния вредных выбросов природного и искусственного происхождения на окружающую

среду, поддержки принятия управленческих решений по сокращению возможных экологических угроз.

**Внедрение результатов исследования.** На основе математических моделей, численных алгоритмов и программного комплекса для мониторинга и прогнозирования экологического состояния воздушных бассейнов промышленных регионов:

математическая модель и программный комплекс для мониторинга и прогнозирования процесса распространения вредных веществ в атмосфере с учетом переменной скорости загрязняющих частиц, а также для поддержки принятия решений по оптимальному расположению возводимых промышленных объектов внедрены в деятельность Бухарского областного управления по экологии и охране природы (Государственный комитет по экологии и охране окружающей среды, справка №02-02/8-2738 от 19.11.2020 г.). В результате внедрения достигнута возможность выработки рекомендаций по осуществлению мер защиты окружающей среды, экономия финансовых затрат на оплату штрафов за счет своевременности предупреждения нарушений норм максимально допустимых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе;

программно-математический комплекс по анализу, наблюдению и прогнозированию процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере внедрен в деятельность ООО «МКМК-409» Бухарской области (Государственный комитет по экологии и охране окружающей среды, справка №02-02/8-2738 от 19.11.2020 г.). В результате внедрения повышена 9-11% точность прогнозирования концентрации вредных газов, пыли и канцерогенов на прилегающих к производственному объекту территориях при неблагоприятных метеорологических условиях и заданных режимах функционирования объекта;

программно-математический комплекс по анализу, наблюдению и прогнозированию процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом изменения скорости частиц внедрен в деятельность ООО «CHORI MEGA MONTAJ» (Государственный комитет по экологии и охране окружающей среды, справка №02-02/8-2738 от 19.11.2020 г.). В результате внедрения повышена на 8-10% точность прогнозирования концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы и на подстилающей поверхности в результате выбросов цементной пыли, песка и сжигания углеводородного топлива в котельных.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы обсуждались на 7 международных и 4 республиканских научных конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 25 научные работы, из которых 11 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 4 в зарубежных и 7 в республиканских журналах, также получены 3

свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ Агентства интеллектуальной собственности РУз.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 118 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены внедрение результатов исследования, сведения об опубликованности результатов и структуре диссертации.

Первая глава диссертации «Анализ состояния проблем математического моделирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере и путей их решения» состоит из четырех параграфов.

В первом параграфе приводятся описание и классификация источников загрязнения атмосферы. Во втором параграфе рассмотрены методы математического моделирования процесса распространения вредных веществ в атмосфере. В третьем параграфе приводится анализ математических моделей процесса загрязнения атмосферы вредными веществами. В четвертом параграфе определены цель и задачи исследования на основе подробного анализа научных источников по теме диссертации.

Вторая глава диссертации «Математические модели мониторинга и прогнозирования процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере» посвящена разработке математических моделей для исследования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере.

В опубликованных научных работах многих авторов при моделировании процесса распространения вредных веществ в атмосфере скорость перемещения загрязняющих частиц по времени обычно принимается постоянной, равной скорости движения воздушной массы атмосферы. В настоящей же работе данный фактор рассматривается как переменная величина и как значимый параметр процесса распространения вредных выбросов в атмосфере.

Скорость перемещения вредных веществ по направлениям в пространстве в процессе их переноса и диффузии в атмосфере изменяется в основном под воздействием скорости ветра. Следовательно, воздействие ветра на различные частицы, т.е. частицы, обладающие разными физико-механическими свойствами, имеет различный характер. Скорость частиц под влиянием этой силы формируется на основе их физико-механических

особенностей. Соответственно, траектория движения разных вредных веществ в атмосферном воздухе различна для каждого их типа.

С учетом изложенных предположений, в работе предложена математическая модель процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом скорости перемещения частиц по направлениям  $u, v, w$ , описываемой на основе законов гидромеханики с помощью многомерного дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \theta}{\partial z} + \sigma \theta = \mu \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \delta Q; \quad (1)$$

$$m \frac{du_x}{dt} = 3\pi\eta d(u - u_x); \quad (2)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = 3\pi\eta d(v - v_y); \quad (3)$$

$$m \frac{dw_z}{dt} = 3\pi\eta d(w - w_z) - mg \quad (4)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\theta|_{z=0} = \theta^0; \quad u_x|_{z=0} = u_x^0; \quad v_y|_{z=0} = v_y^0; \quad w_z|_{z=0} = w_z^0; \quad (5)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_s - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_s - \theta); \quad (6)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_s - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_s - \theta); \quad (7)$$

$$-\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \beta \theta; \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(\theta_s - \theta). \quad (8)$$

Здесь  $\theta$  – концентрация вредных веществ;  $u_x, v_y, w_z$  – составляющие скорости распространения вредных веществ по направлениям;  $u, v, w$  – скорость ветра по направлениям;  $d$  – диаметр частицы;  $m$  – масса частицы;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $\theta^0$  – начальная концентрация вредных веществ в атмосфере;  $\sigma$  – коэффициент поглощения вредных веществ в атмосфере;  $\delta$  – функция Дирака;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  – коэффициент диффузии;  $\beta$  – коэффициент взаимодействия с подстилающей поверхностью;  $Q$  – мощность источников;  $\kappa$  – коэффициент турбулентности;  $\xi$  – коэффициент массообмена через границы расчета;  $\theta_s$  – концентрация вредных веществ за пределом области решения задачи.

Следует отметить, что в постановке задачи (1)–(8) можно наблюдать такие физические процессы как конвективный перенос вредных веществ в атмосфере в результате воздействия воздушных потоков, распространение вредных веществ в атмосфере за счет молекулярной и турбулентной диффузии, а также поглощение вредных веществ за счет влажности атмосферного воздуха.

При определении скорости частиц по направлениям учитываются физико-механические свойства частиц, которые влияют на их движение в

атмосфере, в частности, масса, диаметр, а также динамическая вязкость воздуха.

Разработана нелинейная математическая модель в трехмерной постановке для описания процесса переноса и диффузии вредных веществ при сильном ветре с учетом орографии рассматриваемой местности, плотности и радиуса частиц, коэффициента динамической вязкости и переменной плотности воздуха во взаимосвязи с температурой окружающей среды, ускорения свободного падения, коэффициента формы тела для силы сопротивления и подъемной силы воздушного потока:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} + v_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} + w_* \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} + \sigma h\theta = \mu \left( \frac{\partial^2 (h\theta)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (h\theta)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \right) + \delta Q; \quad (9)$$

$$m \frac{du_*}{dt} = c_f \pi r^2 \rho_* (u_* - U)^2; \quad (10)$$

$$m \frac{dv_*}{dt} = c_f \pi r^2 \rho_* (v_* - U)^2; \quad (11)$$

$$m \frac{dw_*}{dt} = -\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_* - \rho_*) g - k_f \mu_* \pi r w_* + F_n \quad (12)$$

с начальными

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad u_*|_{t=0} = u_*^0; \quad v_*|_{t=0} = v_*^0; \quad w_*|_{t=0} = w_*^0 \quad (13)$$

и граничными условиями

$$-\mu \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi h(\theta_* - \theta); \quad \mu \frac{\partial (h\theta)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi h(\theta_* - \theta); \quad (14)$$

$$-\mu \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi h(\theta_* - \theta); \quad \mu \frac{\partial (h\theta)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi h(\theta_* - \theta); \quad (15)$$

$$-\kappa \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \xi h(\beta\theta - Q_0); \quad \kappa \frac{\partial (h\theta)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi h(\theta_* - \theta). \quad (16)$$

Здесь  $U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  – скорость воздушного потока;  $c_f$  – коэффициент сопротивления частиц воздушному потоку;  $r$  – радиус частицы;  $\rho_*$  – плотность воздуха;  $\rho_*$  – плотность частицы;  $k_f$  – коэффициент формы тела для силы сопротивления;  $\mu_*$  – коэффициент динамической вязкости воздуха;  $F_n$  – подъемная сила потока воздуха;  $h$  – орография местности,  $Q_0$  – мощность выброса вредных веществ в атмосферу с подстилающей поверхности земли;

Уравнения (10)–(12) отражают горизонтальную и вертикальную переменную скорость частиц во времени. При описании скорости частиц учитывались такие физико-механические параметры как ее масса, сопротивление потоку воздуха, радиус, переменная плотность воздуха с учетом температуры окружающей среды. Кроме того, для учета воздействия силы воздушного потока на частицы принимаются во внимание скорость потока воздуха.

В отличие от проанализированных работ, в задаче (9) – (16) горизонтальная и вертикальная скорости частиц (10) – (12) описываются в уравнениях нелинейно.

В последнем параграфе данной главы для проведения вычислительных экспериментов на основе разработанной нелинейной математической модели, описывающей процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, задача была расщеплена по физическим факторам для упрощения нахождения решения.

Для численного решения задачи (9)-(16) искомое решение на всем пространстве принимается как гладкая функция. Используя аддитивность принципиально различных физических процессов переноса и диффузии субстанции в атмосфере в малом интервале времени  $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ , они рассматриваются как отдельные подзадачи.

Процесс переноса примесей вредных веществ по направлениям описывается как задача (A):

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + u_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} + v_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial y} + w_* \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} = \frac{1}{3} \delta Q; \quad (17)$$

$$m \frac{du_*}{dt} = c_j \pi r^2 \rho_* (u_* - U)^2; \quad (18)$$

$$m \frac{dv_*}{dt} = c_j \pi r^2 \rho_* (v_* - U)^2; \quad (19)$$

$$m \frac{dw_*}{dt} = -\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_* - \rho_*) g - k_j \mu_* \pi r w_* + F_n \quad (20)$$

с начальными

$$\theta_1|_{t=0} = \theta_1^0; \quad u_*|_{t=0} = u_*^0; \quad v_*|_{t=0} = v_*^0; \quad w_*|_{t=0} = w_*^0 \quad (21)$$

и граничными условиями

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad (22)$$

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta_1); \quad (23)$$

$$-\kappa \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} \right|_{z=0} = \xi h (\beta \theta_1 - Q_0); \quad \kappa \left. \frac{\partial (h\theta_1)}{\partial z} \right|_{z=H} = \xi h (\theta_* - \theta_1). \quad (24)$$

Процесс диффузии вредных веществ в атмосфере описывается как задача (B):

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial^2 (h\theta_2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (h\theta_2)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial z} \right) + \frac{1}{3} \delta Q \quad (25)$$

с соответствующими начальным

$$\theta_2^0 = \theta_1^{n+1} \quad (26)$$

и граничными условиями

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial x} \right|_{x=0} = \xi h (\theta_* - \theta_2); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \xi h (\theta_* - \theta_2); \quad (27)$$

$$-\mu \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial y} \right|_{y=0} = \xi h (\theta_* - \theta_2); \quad \mu \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = \xi h (\theta_* - \theta_2); \quad (28)$$

$$-\kappa \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial z} \right|_{z=0} = \xi h (\beta \theta_2 - Q_0); \quad \kappa \left. \frac{\partial (h\theta_2)}{\partial z} \right|_{z=H} = \xi h (\theta_* - \theta_2). \quad (29)$$

Процесс поглощения частиц в воздушной массе описывается как задача (В):

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial t} + \sigma h \theta_3 = \frac{1}{3} \delta Q \quad (30)$$

и соответствующими ей начальным

$$\theta_3^0 = \theta_2^{n+1} \quad (31)$$

и граничными условиями

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad (32)$$

$$-\mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad \mu \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi h(\theta_* - \theta_3); \quad (33)$$

$$-\kappa \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \xi h(\beta \theta_3 - Q_0); \quad \kappa \frac{\partial(h\theta_3)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi h(\theta_* - \theta_3). \quad (34)$$

Итак, для решения исходной многомерной нелинейной задачи (9)-(16), ее в соответствии с физическими факторами редуцировали до более простых задач (17) – (24), (25) – (29) и (30) – (34), которые можно решать последовательно по отдельности методом конечных разностей.

В конце главы приведены основные выводы.

Третья глава диссертации «Численные алгоритмы решения задач мониторинга и прогнозирования процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере» посвящена разработке эффективных численных алгоритмов решения задач, сформулированных во второй главе.

Поскольку в задаче (1)-(8) приводятся трехмерные дифференциальные уравнения с соответствующими начальным и граничным условиями, их решение аналитическими методами вызывает трудности. Для решения задачи (1)-(8) использованы конечно-разностные методы, т.е. в область  $D = \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq t \leq T\}$  вводится сетка и здесь  $T$  – максимальное время в заданном отрезке времени, интервалы  $[0, L_x]$ ,  $[0, L_y]$  и  $[0, L_z]$  делятся шагами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , отрезок времени  $[0, T]$  делится шагом  $\Delta t$ . В результате получаем сеточную область  $\Omega_{\text{сет}}$ :

$$\Omega_{\text{сет}} = \{(x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n\Delta t);$$

$$i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}, k = \overline{1, L}, n = \overline{0, N}, \Delta t = \frac{T}{N_i}\}.$$

Для решения трехмерной задачи (1)-(8) используется неявно конечно-разностная схема и уравнение (1) по направлению  $Ox$  аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta t/3} + u_v^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} + v_v^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i,j+1,k}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta y} + w_v^{n+\frac{1}{3}} \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta z} + \\ & + \sigma \theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \mu \frac{\theta_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 2\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \theta_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x^2} + \mu \frac{\theta_{i,j-1,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j+1,k}^n}{\Delta y^2} + \end{aligned} \quad (35)$$



$$+ \frac{\kappa_{z-0.5}\theta_{i,j,k-1}^n - (\kappa_{z-0.5} + \kappa_{z+0.5})\theta_{i,j,k}^n + \kappa_{z+0.5}\theta_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3}\delta_{i,j}Q.$$

Группируя подобные члены, после упрощения уравнения (35), его можно свести к трехдиагональной системе линейных алгебраических уравнений:

$$a_{i,j,k}\theta_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{i,j,k}\theta_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{i,j,k}\theta_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{i,j,k},$$

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

$$a_{i,j,k} = \frac{\mu}{\Delta x^2}; b_{i,j,k} = \frac{3}{\Delta t} - \frac{u_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} + \frac{2\mu}{\Delta x^2} + \sigma; c_{i,j,k} = \frac{\mu}{\Delta x^2} - \frac{u_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x};$$

$$d_{i,j,k} = - \left( \frac{3}{\Delta t}\theta_{i,j,k}^n - \frac{v_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta y}\theta_{i,j+1,k}^n + \frac{v_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta y}\theta_{i,j,k}^n - \frac{w_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta z}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{w_x^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta z}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j-1,k}^n - \right. \\ \left. - \frac{2\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2}\theta_{i,j+1,k}^n + \frac{\kappa_{z-0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k-1}^n - \frac{\kappa_{z-0.5} + \kappa_{z+0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k}^n + \frac{\kappa_{z+0.5}}{\Delta z^2}\theta_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3}\delta_{i,j}Q \right).$$

Граничные условия (6) заменяются на конечные разности второго порядка точности и получаются формулы вычисления прогоночных коэффициентов и значений концентрации вредных веществ на границе:

$$\alpha_{0,j,k} = \frac{b_{1,j,k}\mu - 4\mu c_1}{a_{1,j,k}\mu - 2\Delta x\xi c_{1,j,k} - 3\mu c_{1,j,k}}; \beta_{0,j,k} = \frac{-2\Delta x\xi\theta_{0,j,k} - d_{1,j,k}\mu}{a_{1,j,k}\mu - 2\Delta x\xi c_{1,j,k} - 3\mu c_{1,j,k}}; \\ \theta_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{2\Delta x\xi\theta_n - \beta_{N-2,j,k}\mu - \alpha_{N-2,j,k}\beta_{N-1,j,k}\mu + 4\beta_{N-1,j,k}\mu}{\alpha_{N-2,j,k}\alpha_{N-1,j,k}\mu - 4\alpha_{N-1,j,k}\mu + 2\Delta x\xi + 3\mu}.$$

Аналогично, используя вышеуказанные действия выполняем для направлений  $Oy$  и  $Oz$ .

Для вычисления уравнений (2)-(4) используется неявная конечно-разностная схема для каждого направления, т.е. по направлению  $Ox$  и получим:

$$u_x^{n+\frac{1}{3}} = \frac{mu_x^n + \Delta t\pi\eta du}{m + \Delta t\pi\eta d}; v_x^{n+\frac{1}{3}} = \frac{mv_x^n + \Delta t\pi\eta dv}{m + \Delta t\pi\eta d}; w_x^{n+\frac{1}{3}} = \frac{mw_x^n + \Delta t\pi\eta dw - mg\Delta t/3}{m + \Delta t\pi\eta d}.$$

А для направлений  $Oy$  и  $Oz$  значения  $u_x, v_x, w_x$  находятся аналогичным способом.

Для решения многомерной нелинейной задачи (9)-(16) использована неявная конечно-разностная схема второго порядка точности.

Перед решением задачи (9)-(16), вычисляются уравнения (10)-(12) для определения скоростей частиц по направлениям  $x, y, z$ , используя неявно конечно-разностную схему в следующем виде по  $Ox$ :

$$u_x^{n+\frac{1}{3}} = \frac{3m}{3m - 2c_f\pi r^2\rho_p\ddot{u}\Delta t + 2c_f\pi r^2\rho_p U\Delta t} u_x^n - \frac{c_f\pi r^2\rho_p\ddot{u}^2\Delta t + c_f\pi r^2\rho_p U^2\Delta t}{3m - 2c_f\pi r^2\rho_p\ddot{u}\Delta t + 2c_f\pi r^2\rho_p U\Delta t};$$

$$v_y^{n+1/3} = \frac{3m}{3m - 2c_p \pi r^2 \rho_a \bar{v} \Delta t + 2c_p \pi r^2 \rho_a U \Delta t} v_y^n - \frac{c_p \pi r^2 \rho_a \bar{v}^2 \Delta t + c_p \pi r^2 \rho_a U^2 \Delta t}{3m - 2c_p \pi r^2 \rho_a \bar{v} \Delta t + 2c_p \pi r^2 \rho_a U \Delta t};$$

$$w_x^{n+1/3} = \frac{9m}{9m + 3k_f \mu_a \pi r \Delta t} w_x^n - \frac{4\pi r^3 (\rho_n - \rho_a) g \Delta t - 3F_n \Delta t}{9m + 3k_f \mu_a \pi r \Delta t}.$$

Аналогично способом вычисляются скорости частиц  $u_x, v_x, w_x$  для направлений  $Oy$  и  $Oz$ .

Затем уравнение (9) и граничные условия (14), (15), (16) аппроксимируются по направлениям  $Ox, Oy$  и  $Oz$  со вторым порядком точности по времени и пространственным переменным. В результате чего получаем системы линейных алгебраических уравнений, которые решаются методом прогонки.

Приближенность итерационного процесса проверяется с помощью условия:

$$|u_x^{(s+1)} - u_x^{(s)}| < \varepsilon; |v_x^{(s+1)} - v_x^{(s)}| < \varepsilon; |w_x^{(s+1)} - w_x^{(s)}| < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - точность требуемого решения,  $s$  - количество итераций. Значение первоначальной итерации равно решению в предыдущем временном слое.

В общей сложности все разработанные алгоритмы соответствуют данным полевых измерений.

В четвертой главе диссертации «Разработка программного комплекса мониторинга и прогнозирования процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере» описан программный комплекс для мониторинга и прогнозирования воздушных бассейнов промышленных регионов, разработанный на основе предложенных математических моделей и вычислительных алгоритмов. Также в главе приведен анализ и интерпретация результатов проведенных вычислительных экспериментов по оценке негативного влияния промышленных выбросов на прилегающие территории.

Программный комплекс разработан в программной среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. При графической визуализации результатов вычислительных экспериментов использована библиотека ILNumerics.

Разработанный программный комплекс состоит из следующих программных модулей:

- модуль «PSV-Calc» позволяет определить скорости частиц вредных веществ путем выбора линейного или нелинейного вида дифференциальных уравнений, описывающих движение частиц в пространстве;

- модуль «AIRMOD view» предназначен для проведения вычислительных экспериментов на основе численных алгоритмов решения задач линейного и нелинейного типов;

- модуль «AirQ-MS» позволяет проводить вычислительные эксперименты на основе эффективного численного алгоритма, разработанного методом физического расщепления задачи в соответствии с физическими факторами для минимизации времени расчета и количества вычислительных операций.

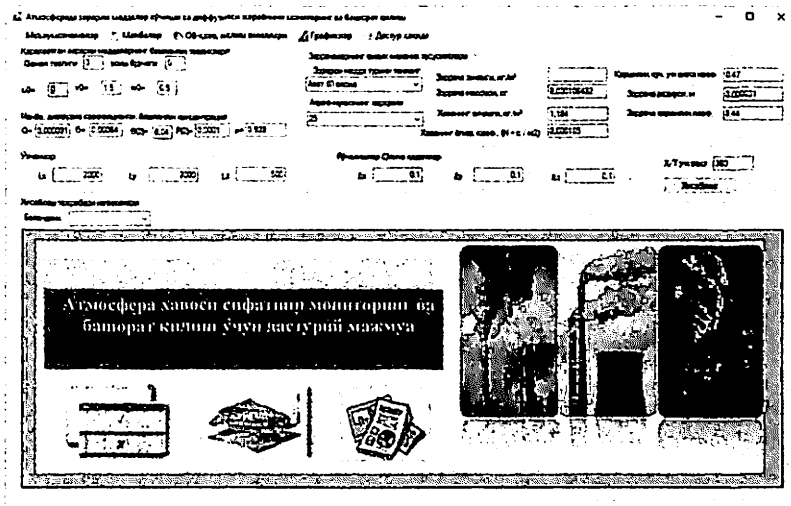


Рис. 1. Общий вид интерфейса программного комплекса «AirQ-MS»

Проведены вычислительные эксперименты для исследования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом орографических характеристик рассматриваемой территории.

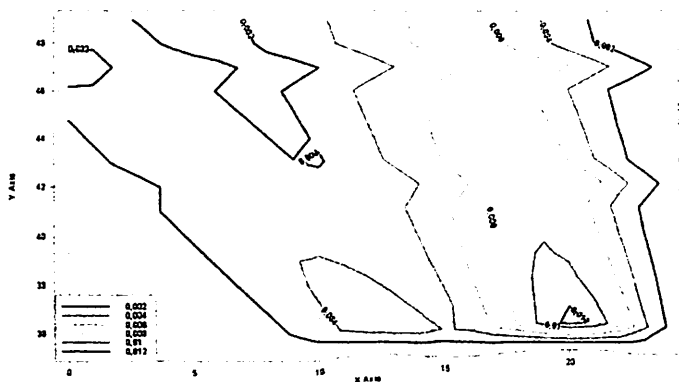
При учете параметра  $h$ , описывающего рельеф местности, концентрация вредных веществ может распределяться в приземном слое атмосферы неравномерно. Так, при  $h < 1$  воздушный поток в разной степени блокируется возвышенностями и холмами, имеющимися в рассматриваемой области (рис. 2).

Если же  $h=1$ , то подразумевается достаточно ровная подстилающая поверхность, и в таком случае поле концентрации вредных веществ распределяется практически равномерно (рис. 3-4).

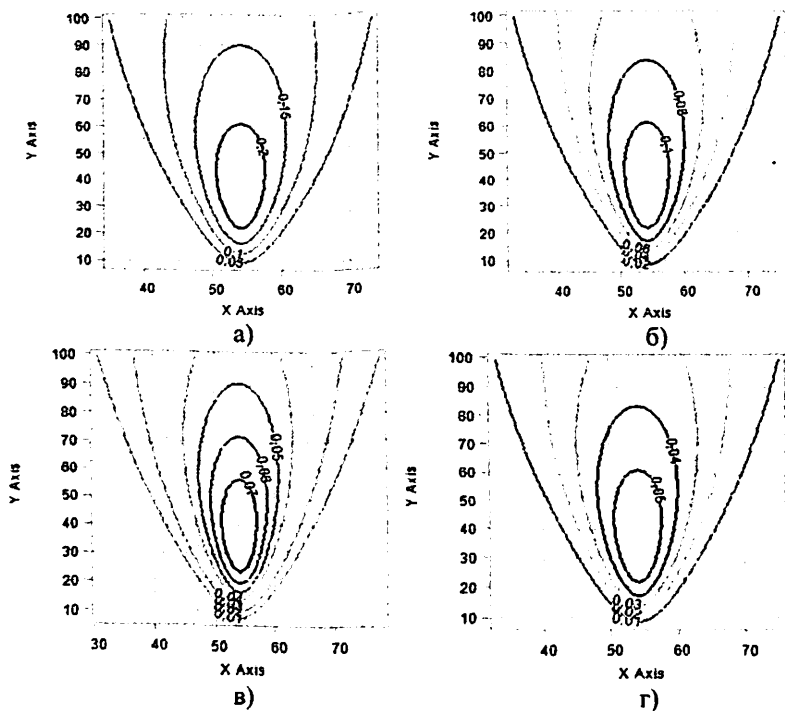
Графический анализ полученных результатов показал, что на процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, главным образом, влияют скорость и направление ветра.

В соответствии с результатами проведенных вычислительных экспериментов можно сказать, что на горизонтальную и вертикальную скорость частиц вредных веществ, наряду с составляющими скорости ветра, существенно влияют физико-механические свойства рассматриваемых частиц: радиус, плотность, масса и др.

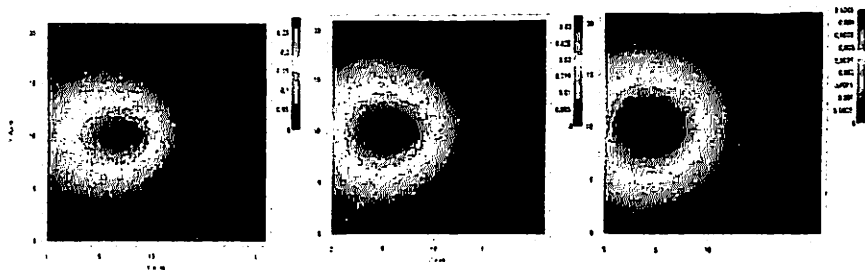
Регулярное повышение ПДК вредных веществ при неблагоприятных метеоусловиях, например, при доминировании слабых ветров (рис. 3а) в ряде случаев может быть основанием к пересмотру границ санитарно-защитной зоны на территориях, прилегающих к производственному объекту.



**Рис. 2. Результаты вычислительных экспериментов по исследованию процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом орографии рассматриваемой местности ( $z=10$  м)**



**Рис. 3. Визуализация процесса переноса и диффузии оксида серы (IV) при разных скоростях ветра (ПДК=0,05 мг/м³).**



*a)  $z=300$  м;*

*b)  $z=400$  м;*

*в)  $z=500$  м;*

**Рис. 4. Визуализация процесса переноса и диффузии оксида азота в атмосфере**

Результаты, полученные на основе разработанных математического аппарата и программного комплекса, могут быть использованы в деятельности подведомственных организаций Государственного комитета по экологии и охране окружающей среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертационной работе на тему «Разработка нелинейных математических моделей, вычислительных алгоритмов для мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии в атмосфере» получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ научных исследований, посвященных методам математического моделирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере.

2. Разработана трехмерная математическая модель для мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом физико-механических свойств загрязняющих частиц, выбрасываемых в атмосферу.

3. Разработана трехмерная нелинейная математическая модель для мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом физико-механических свойств частиц, а также топографии рассматриваемой территории.

4. Для решения трехмерных задач переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере разработан вычислительный алгоритм, обеспечивающий точность аппроксимации второго порядка относительно времени и пространственных переменных.

5. Разработан численный алгоритм решения задачи оценки и прогнозирования полей концентрации вредных веществ в пограничном слое атмосферы на основе метода расщепления по физическим факторам, с использованием неявной конечно-разностной схемы второго порядка аппроксимации по времени и пространственным переменным.

6. На основе проведенных вычислительных экспериментов установлено влияние основных факторов на процесс распространения вредных веществ в атмосфере. В частности, определено влияние таких параметров как метеоусловия (скорость и направление ветра, температура и влажность окружающей среды); топография рассматриваемой местности; физико-механические свойства вредных веществ.

7. Результаты диссертационной работы, примененные в деятельности промышленных объектов Бухарской области, позволили повысить на 8-11% корректность прогнозирования уровня концентрации продуктов горения и неорганических частиц пыли в пограничном слое атмосферы и на подстилающей поверхности земли. Результаты численных расчетов позволили обеспечить поддержку принятия решений по своевременному ремонту очистительных устройств и снизить на 6-8% финансовые расходы, связанные с нарушением санитарных норм концентрации вредных веществ.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY  
OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

---

**BUKHARA STATE UNIVERSITY**

**SHAFIEV TURSUN RUSTAMOVICH**

**DEVELOPMENT OF NONLINEAR MATHEMATICAL MODELS,  
COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR MONITORING AND  
FORECASTING THE TRANSPORT AND DIFFUSION PROCESSES IN  
THE ATMOSPHERE**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

**Bukhara – 2021**

**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 B2020.3.PhD/T1119.**

The dissertation has been prepared at Bukhara State University.

The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website [www.tuit.uz](http://www.tuit.uz) and an the website of «ZiyoNet» Information and educational portal [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

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

**Official opponents:** **Sadullaeva Shakhlo Azimbaevna**  
doctor of technical sciences, dosent

**Turgunov Abrorzhon Makhmatsolievich**  
doctor of philosophy on technical sciences

**Leading organization:** **National university of Uzbekistan**

The defense will take place “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 at \_\_\_\_\_ the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

The dissertation can be reviewed at the Information Resourse Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No \_\_\_\_\_). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 y.  
(mailing report No. \_\_\_\_ on “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 y.).

**R.Kh. Khamdamov**  
Chairman of the scientific council  
awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

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

**Sh.A.Sadullaeva**  
Chairman of the academic seminar under  
the scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent



## INTRODUCTION (abstract of the PhD thesis)

**The aim of the research work** is to develop and improve mathematical models, computational algorithms and software for monitoring and forecasting the ecological state of air basins in industrial regions.

**The object of the research work** is the process of atmospheric transport and diffusion of harmful substances emitted by industrial facilities and natural sources of pollution.

**The scientific novelty of the research work** is as follows:

a linear three-dimensional mathematical model has been developed that describes the process of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere, taking into account the physical and mechanical properties of particles;

a three-dimensional nonlinear mathematical model of the process of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere has been developed, taking into account the variable speed of movement of polluting particles, weather and climatic, and orographic characteristics of the territory under consideration;

an efficient numerical algorithm has been developed for solving the problems of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere, based on the use of an implicit finite-difference scheme of a high order of accuracy;

an efficient numerical algorithm for solving the nonlinear problem of the spread of harmful emissions in the atmosphere has been developed, based on the method of splitting the problem by physical factors;

**Implementation of the research results.** Based on mathematical models, numerical algorithms and a software package for monitoring and forecasting the ecological state of air basins in industrial regions:

a mathematical model and a software package to monitor and predict the spread of harmful substances in the atmosphere, taking into account the variable speed of contaminants, and to support decision-making on the optimal location of industrial facilities under construction, were introduced into the activities of the Bukhara Regional Department for Ecology and Nature Protection (State Committee for Ecology and Environmental Protection, reference No. 02-02 / 8-2738 of 19.11.2020). As a result of the implementation, it became possible to develop recommendations for the implementation of environmental protection measures, to save financial costs for paying fines due to the timely prevention of violations of the norms of maximum permissible concentrations of harmful substances in the atmospheric air;

a software and mathematical complex for the analysis, observation and forecasting of the process of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere were introduced into the activities of LLC "SMMC-409" in Bukhara region (State Committee for Ecology and Environmental Protection, reference No. 02-02 / 8-2738 of 19.11.2020). As a result of the implementation, the accuracy of predicting the concentration of harmful gases, dust and carcinogens in the territories adjacent to the production facility under unfavorable meteorological conditions and specified operating modes of the facility increased by 9-11%;

a software and mathematical complex for the analysis, observation, and forecasting the process of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere, taking into account the change in the particle speed, was introduced into the activities of “CHORI MEGA MONTAJ” LLC (State Committee for Ecology and Environmental Protection, reference No. 02-02 / 8-2738 of 19.11.2020). As a result of the implementation, the accuracy of predicting the concentration of harmful substances in the surface layer of the atmosphere and the underlying surface due to emissions of cement dust, sand, and combustion of hydrocarbon fuel in boiler houses increased by 8-10%.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, references, and appendices. The volume of the dissertation is 118 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Ravshanov N., Shafiev T.R. Nonlinear mathematical model for monitoring and predicting the process of transfer and diffusion of fine-dispersed aerosol particles in the atmosphere // Journal of Physics: Conference Series. London, 2019. Vol. 1260. Issue 10. (№3; Scopus; IF=0.54).
2. Ravshanov N., Abdullaev Z., Shafiyev T. Mathematical model and numerical algorithm to study the process of aerosol particles distribution in the atmosphere // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, Tashkent, 2019. (Олий аттестация комиссияси Раёсати қарори №269/8-сон, 30.09.2019 й.).
3. Ravshanov N., Shafiev T.R., Daliev S. Study of the main factors affecting the spread of aerosol particles in the atmosphere // Journal of Physics: Conference Series. London, 2021. Vol. 1791. (№3; Scopus; IF=0.54).
4. Равшанов Н., Шафиев Т.Р., Орипжонова У. Численное исследования процесса распространения мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере // Вестник аграрной науки Узбекистана. 2019. – № 4/2. – С. 279–284. (05.00.00; №18)
5. Равшанов Н., Шафиев Т.Р., Таштемирова Н.Н. Нелинейная математическая модель для мониторинга и прогнозирования процесса распространения аэрозольных частиц в атмосфере // Вестник ТУИТ. 2019. – №2. – С. 45–60. (05.00.00; №31)
6. Шафиев Т.Р. Математическая модель для мониторинга и прогнозирования процесса распространения аэрозольных частиц в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. – № 1(25). – С. 69–84. (05.00.00; №23)
7. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Моделирования процесс распространения загрязняющих веществ в атмосферы с учётом физико-механических свойств частиц // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. – № 3(27). – С. 60–75. (05.00.00; №23)
8. Равшанов Н., Мурадов Ф.А., Шафиев Т.Р. Математическая модель и эффективный численный алгоритм для мониторинга и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере с учётом физико-механических свойств частиц // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. – №5(29). – С. 120–140. (05.00.00; №23)
9. Ravshanov N., Shafiev T.R. Numerical study process distribution of contaminated substances in the atmosphere taking into account the physical and mechanical properties of particles // Bull. TUIT Manag. Commun. Technol. 2021. – №2(46). – С. 10–15. (Олий аттестация комиссияси Раёсати қарори №283/7.1-сон, 30.07.2020 й.).

10. Равшанов Н., Шафиев Т.Р., Мурадов Ф.А. Нелинейная математическая модель и эффективный численный алгоритм для мониторинга и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере с учётом орографии местности // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. – №1(31). – С. 57–75. (05.00.00; №23)

11. Шафиев Т.Р., Атаева Г.И., Суюнов М.М. Математическая модель, эффективный численный алгоритм и программный комплекс для мониторинга и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере с учётом физико-механических свойств частиц // Muhammad al-Xorazmiy avlodlari. 2021. № 1(15). –С. 126–130. (05.00.00; №10)

## II бўлим (II часть; II part)

12. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Математическая модель для исследования процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учётом орографии местности // Экологические чтения – 2021: Материалы XII Национальной научно-практической конференции с международным участием. – Омск, 2021. – С. 261-268.

13. Шафиев Т.Р. Нелинейная математическая модель процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом переменной скорости частиц и орографии местности // материалы IV Международной научно-практической конференции "SCIENTIFIC COMMUNITY: INTERDISCIPLINARY RESEARCH". Гамбург, Германия, 2021. – С. 56-64.

14. Равшанов Н., Шафиев Т. Модель, численный алгоритм и программное средство для мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий напредриятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях». Фергана, 2019. – С. 235–238.

15. Шафиев Т.Р. Численное исследования процесса распространения аэрозольных частиц в атмосфере // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: доклады республиканской научно-технической конференции. Самарканд, 2019. – С. 242–249.

16. Равшанов Н., Хамдамов Р., Шафиев Т. Разработка нелинейной математической модели и численного алгоритма для прогнозирования процесса переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере // материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные идеи, разработки и современные проблемы их применения в производстве, а также в обучении». Андижан, 2019. – С. 143–147.

17. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Моделирование процесса распространения мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере // Тезисы Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий». Ташкент, 2019. – С. 97–98.

18. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнига таъсир этувчи асосий омилларни сонли тадқиқ қилиш // Инновацион ёндашувлар илм-фан тараққиёти калити сифатида: ечимлар ва истиқболлар / Республика илмий-амалий анжумани маърузалар тўплами. Жиззах, 2020. – С. 139–145.

19. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Атмосферада аэрозол заррачаларининг кўчиши ва диффузияси жараёнига таъсир этувчи асосий омилларни сонли тадқиқ қилиш // Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари: Республика илмий-амалий анжумани маърузалар тўплами. Қарши, 2020. – С. 58–62.

20. Равшанов Н., Шафиев Т. Разработка нелинейной математической модели для прогнозирования процесса переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере // Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратиш мавзусида профессор-ўқитувчилар ва талабаларнинг XV-илмий-амалий конференцияси. Самарканд, 2020. – С. 90–92.

21. Шафиев Т.Р. Атмосферада аэрозол заррачаларининг кўчиши ва диффузиясини мониторинг ва башоратлаш учун математик модел ва ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқиш // «Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётда: муаммолар ва ечимлар»: Халқаро илмий амалий анжуман материаллари. Андижон, 2020. – С. 140–142.

22. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Численное исследование процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учётом орографии местности // тезисы международной научно-практической конференции «Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий». Бухара, 2021. – С. 53–55.

23. Шафиев Т.Р., Нарзикулов З.Х., Атаева Г.И. Ядгарова Л.Дж. Программа для ЭВМ «AIRMOD» view // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 063308. 19.03.2019.

24. Равшанов Н., Шафиев Т.Р. Программа для ЭВМ «PSV-Calc» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 09169. 19.09.2020.

25. Шафиев Т.Р., Равшанов З.Н., Программа для ЭВМ «AirQ-MS» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 09168. 19.09.2020.

Автореферат «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус тилларидаги матнларини мослиги текширилди.