

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

---

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ  
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

**МУРАДОВ ФАРРУХ АБДУКАХАРОВИЧ**

**АТМОСФЕРАДА ЗАРАРЛИ МОДДАЛАРНИНГ КЎЧИШИ ВА  
ДИФФУЗИЯСИ ЖАРАЁНЛАРИНИ БАШОРАТЛАШ УЧУН  
МОДЕЛЛАР, АЛГОРИТМЛАР ВА ДАСТУРЛАР МАЖМУИ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2020

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

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

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

**Мурадов Фаррух Абдукахарович**

Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларини  
башоратлаш учун моделлар, алгоритмлар ва дастурлар мажмуи . . . . . 3

**Мурадов Фаррух Абдукахарович**

Модели, алгоритмы и программные комплексы для прогнозирования  
процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере . . . . . 21

**Muradov Farrux Abdukaxarovich**

Models, algorithms and program complexes for the forecasting the processes of  
pollutants transport and diffusion in the atmosphere . . . . . 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works . . . . . 43

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

---

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ  
ИЛМий-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

**МУРАДОВ ФАРРУХ АБДУКАХАРОВИЧ**

**АТМОСФЕРАДА ЗАРАРЛИ МОДДАЛАРНИНГ КЎЧИШИ ВА  
ДИФФУЗИЯСИ ЖАРАЁНЛАРИНИ БАШОРАТЛАШ УЧУН  
МОДЕЛЛАР, АЛГОРИТМЛАР ВА ДАСТУРЛАР МАЖМУИ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.3.PhD/Т453 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университети қошидаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказида бажарилган.

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

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Равшанов Нормаҳмад</b> техника фанлари доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Полатов Асҳад Мухамеджанович</b> физика-математика фанлари доктори, профессор <b>Исомиддинов Анвар Иномжонович</b> техника фанлари бўйича фалсафа доктори
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти</b>

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 Илмий кенгашнинг 2020 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 2020 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.  
(2020 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**Р.Ҳ. Ҳамдамов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

**Ф.М. Нуралиев**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

**М.Б. Хидирова**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси т.ф.д., катта илмий ходим

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда атроф-муҳитни муҳофаза қилишга доир қарорлар қабул қилишга кўмаклашувчи ва уни антропоген таъсирдан ҳимоя қилишга йўналтирилган математик моделлар, самарали сонли алгоритмлар ҳамда дастурий таъминотларни ишлаб чиқишга катта эътибор берилмоқда. Жумладан, атмосферанинг чегаравий қатламида зарарли моддаларнинг тарқалиш жараёнини кузатиш ва башоратлаш алоҳида назарий ва амалий қизиқиш уйғотмоқда. Атмосферада ифлослантирувчи моддалар концентрациясининг тарқалишини тезкор кузатиш ва баҳолаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш муаммоси айниқса АҚШ, Канада, Буюк Британия, Европа Иттифоқи мамлакатлари, Россия Федерацияси, Ҳиндистон ва Хитой каби саноати ривожланган мамлакатларда долзарблик касб этмоқда.

Жаҳонда зарарли антропоген ва табиий чиқиндиларни атмосферада узатилиши ва диффузияси жараёнларининг янада такомиллаштирилган математик моделларини ишлаб чиқишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу муаммонинг математик аппаратини яратишда, хусусан, иқлим кўрсаткичлари ва ўрганилаётган ҳудуд орографиясини ҳисобга олиш, ҳаво массасининг турбулент ҳаракати ҳисобига атмосферага кўтарилган зарарли моддалар эмиссиясини ҳисобга олиш ҳамда кичик ўлчамли зарраларнинг чўқиш тезлигини унинг физикавий-механик хоссаларига боғлиқ тарзда ўзгариши каби омилларга алоҳида эътибор бериш зарурати юзага келди.

Ўзбекистон Республикасида зарарли антропоген босим остидаги экотизимларнинг ўзгариш жараёнлари, шунингдек, экологик мувозанатнинг бузилишидан кутиладиган оқибатларни ўрганиш бўйича ҳам кенг кўламли тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Шу билан бир қаторда, атмосферадаги техноген ва табиий таъсирлардан келиб чиққан зарарли аэрозол чиқиндиларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларини кузатиш ва башоратлаш учун янги математик моделларни ишлаб чиқиш ва мавжудларини такомиллаштириш, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларни ишлаб чиқишга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «... одамларнинг экологик хавфсиз муҳитда яшашини таъминлаш, ... атроф-табиий муҳит, аҳоли саломатлиги ва генофондига зиён етказадиган экологик муаммоларни олдини олиш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш, ... атроф муҳитга зарарли моддалар чиқишини камайтириш»<sup>1</sup> вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларнинг амалга оширилишини замонавий ахборот технологиялар

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

асосида тадқиқ қилинаётган жараёнга таъсир қилувчи турли хил омилларни ҳисобга олган ҳолда зарарли чиқиндиларнинг атмосферада тарқалиши жараёнини кузатиш ва башоратлаш учун зарурий ишончли математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва моделлаштиришнинг автоматлаштирилган тизимларини ишлаб чиқиш вазифаларини бажаришсиз тасаввур қилиб бўлмайди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 21 апрелдаги ПФ-5024-сон «Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш соҳасида давлат бошқаруви тизимини такомиллаштириш тўғрисида»ги Фармони, Вазирлар Маҳкамасининг 2017 йил 23 майдаги 310-сон «Ўзбекистон Республикаси Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат кўмитаси тўғрисидаги низомни тасдиқлаш ҳақида» ва 2019 йил 3 сентябрдаги 737-сон «Ўзбекистон республикасида атроф табиий муҳитнинг давлат мониторинги тизимини такомиллаштириш тўғрисида» қарорларида ва мазкур соҳага тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга ошириш учун ушбу диссертация тадқиқоти маълум даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Атмосферада ифлослантирувчи чиқиндиларнинг тарқалиш жараёнини кузатиш ва башоратлаш учун математик моделларни, ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий-ускунавий тизимларни яратиш ва такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқот ишлари дунёнинг етакчи илмий марказларида ва олий ўқув юртларида олиб борилмоқда. Жумладан, зарарли моддаларнинг атмосфера чегаравий қатламида кўчиши ва диффузияси мураккаб динамик жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш, шунингдек айтилган жараёнларни математик моделлаштириш услугиётининг фундаментал жиҳатлари E. Naslund, L. Thaning, J. Geiser, L.C. Berselli, W.J. Layton, J.M. Germano, H. Ferziger, U. Piomelli, G.S. Winckelmans, W.C. Reynolds, Г.И. Марчук, М.И. Лунев, М.Е. Берлянд, В.В. Пененко, В.М. Белолипецкая, М.В. Меньшов, С.Г. Черний, С.В. Шаров, В.Ф. Рапута каби олимларнинг тадқиқотларида ёритилган.

Ўзбекистон Республикасида атмосферада аэрозол чиқиндиларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнлари ҳамда атроф муҳит ҳимоя қилиш масалаларини ечиш учун математик моделлар, алгоритмлар ва дастурларни ишлаб чиқиш муаммолари Ф.Б. Абуталиев, К.С. Каримбердиева, М.Л. Арушанов, Н. Равшанов, Ж.О. Тоҳиров, Б.С.Телемуратова ва бошқа олимлар тадқиқотларида ўрганилган.

Тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, бугунги кунда атмосферадаги аэрозол чиқиндиларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларининг кўп ўлчовли қўйилишидаги математик моделлари, кичик ўлчамли заррачалар

чўкиш тезлигининг ўзгариши 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 илмий тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион маркази ва ЎЗР ФА В.И.Романовский номидаги Математика институти илмий-тадқиқот ишлари режаларининг А-5-12 «Саноат минтақаларининг экологик ҳолатини башоратлаш ва мониторинги учун математик таъминотни яратиш» (2015-2017) ва БВ-Атех-2018-9 «Атмосфера ва сув ресурсларини техноген омилларида ҳимоя қилиш масалаларини ечиш учун моделлар, тақсимланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар яратиш» (2018-2019) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** саноат ҳудудларида экологик вазиятни тадқиқ қилиш, башоратлаш ва бошқариш бўйича қарорлар қабул қилиш учун математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларни ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

қаралаётган ҳудудларда атмосфера ҳолатини баҳолаш масалалари бўйича комплекс тадқиқот олиб бориш, башоратлаш ва бошқариш қарорларини қабул қилиш учун инфорацион модель ва маълумотлар базасини яратиш;

кичик ўлчамли зарралар чўкиш тезлигининг ўзгариши ва иқлимий омиллари ҳисобга олган ҳолда аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик моделини ишлаб чиқиш;

зарарли аэрозол чиқиндиларнинг уч ўлчовли атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик моделини метеорологик маълумотларни ҳисобга олган ҳолда такомиллаштириш;

атмосферада аэрозол заррачаларнинг кўчиши ва диффузияси масалаларини ечиш учун физик хусусиятларга мос қисмларга ажратиш усулига асосланган самарали ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш;

атмосферанинг ер сатҳи қатламида кичик ўлчамли зарраларнинг тарқалиш масалаларини ечиш учун вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан иккинчи тартибли аниқликда аппроксимациялаш асосида самарали ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш;

зарарли аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада тарқалиш жараёнини тадқиқ этиш, башоратлаш ва бошқарув бўйича қарорларни қабул қилиш, шунингдек ЭҲМ да ҳисоблаш тажрибаларини олиб бориш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида саноат объектларидан ва ифлосланишнинг бошқа манбааларидан чиқаётган зарарли аэрозол зарраларнинг атмосферада кўчиши ва диффузия жараёни қаралган.

**Тадқиқотнинг предмети**ни математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва ЭХМда ҳисоблар олиб бориш учун объектга йўналтирилган дастурий мажмуалар ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертацион тадқиқот жараёнида ҳисоблаш математикаси, математик ва компьютерли моделлаштириш усуллари, шунингдек дастурий маҳсулот ишлаб чиқиш учун объектга йўналтирилган дастурлашнинг технологияларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

кичик ўлчамли заррачаларнинг чўкиш тезлигининг ўзгариши ва иқлимий омилларни ҳисобга олган ҳолда аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилган;

иқлимий омилларни ҳисобга олган ҳолда аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларининг уч ўлчовли математик модели такомиллаштирилган;

аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси масалаларини ечиш учун вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аниқликка эга самарали сонли алгоритм яратилган;

аэрозол зарраларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси масаласини ечиш учун физик хусусиятларга мос қисмларга ажратиш усулига асосланган ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

диссертация тадқиқотининг ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминот кўринишидаги натижаларидан санитария нормаларини ҳисобга олган ҳолда саноат ҳудудларида атроф-муҳитнинг экологик ҳолатига зарарли чиқиндиларнинг таъсирини баҳолаш ва башоратлаш аниқлигини, тезкор кузатув олиб боришда фойдаланилган;

ишлаб чиқилган математик аппарат зарарли моддаларнинг иқлимий омиллар ҳисобига атроф муҳитда ютилиши хусусияти, зарарли заррачаларнинг чўкиш тезлиги ва тадқиқ қилинаётган жараённинг ўзгаришига таъсир қилувчи бошқа ташқи ва ички омиллар ҳисобига атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларини ишончли ифодалаган;

зарарли саноат чиқиндиларининг салбий оқибатлари ҳақида ўз вақтида огоҳлантириш ҳисобига молиявий ва меҳнат харажатларини тежаган ҳолда зарурий табиатни асраш чора-тадбирларини жорий этиш бўйича қарор қабул қилишни қўллаб қувватлаш учун атмосферанинг чегаравий қатлами ва ер юза қисмида ифлосланиш концентрациясини автоматик ҳисоблаш ва визуаллаштириш учун дастурий-ускунавий воситалар мажмуаси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончилиги зарарли моддаларнинг атмосферада тарқалиши тенграмаси ва



унинг чегаравий шартлари масса ва импульснинг кўчиши ва сақланиши 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 тарқалиш жараёнининг математик моделини ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришдан иборат бўлиб, иқлим омилларининг ўзгаришлари, турбулентлик ва ютилиш коэффициентлари, шунингдек кичик ўлчамли зарраларнинг физик ва механик хусусиятларига боғлиқ равишда чўкиш тезлиги ўзгарувчанлиги инобатга олинди, шунингдек, аэрозол зарраларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнининг икки ва уч ўлчовли масалаларини юқори тартибли аппроксимациялашга ўзгарувчилар йўналиши бўйича, физик хусусиятларига мос қисмларга ажратиш ва дифференциал ҳайдаш усулларида фойдаланган ҳолда ҳисоблашнинг янада аниқ ва самарали сонли алгоритмлари ишлаб чиқилганлигидан иборатдир.

Диссертация тадқиқотининг амалий аҳамияти кичик ўлчамли қаттиқ зарралар ва газ аралашмаларининг атмосферанинг чегаравий қатламида тарқалиши жараёнларини кузатиш ва башоратлаш, зарарли саноат чиқиндиларининг атроф муҳитга салбий таъсирини баҳолаш ва содир бўлиши мумкин бўлган экологик хавфни камайтириш бўйича бошқарув қарорларини қабул қилишни қўллаб қувватлаш учун дастурлар мажмуани ишлаб чиқишда ўз аксини топади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Саноат ҳудудлари атмосферасининг экологик ҳолатини кузатиш ва башоратлашнинг математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий-ускунавий воситалари мажмуи асосида:

шамолнинг йўналиши ва тезлигини ҳисобга олган ҳолда атмосферада зарарли моддаларнинг тарқалиш жараёни билан боғлиқ қарорларни қабул қилишни қўллаб қувватлаш, кузатиш ва башоратлаш, шунингдек, янги саноат объектларининг оптимал жойлаштирилиши учун математик модель ва дастурий таъминот Самарқанд вилояти Экология ва табиатни муҳофаза қилиш бошқармасида жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2019 йил 23 декабрдаги 33-8/9025 сонли маълумотномаси). Жорий қилишдан самарадорликка Самарқанд вилояти муҳитида зарарли моддалар концентрациясининг ошганлиги ҳақидаги ўз вақтидаги огоҳлантириш аниқлигининг 13-14% га оширган;

зарарли аэрозол чиқиндиларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнини кичик ўлчамли заррачаларнинг чўкиш тезлигини ҳисобга олган ҳолда таҳлил қилиш, кузатиш ва башоратлашнинг математик ва дастурий таъминоти «Жомбой Яшил Чироқлари» МЧЖ да жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг

2019 йил 23 декабрдаги 33-8/9025 сонли маълумотномаси, Ўзбекистон Республикаси Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитасининг 2019 йил 22 ноябрдаги 02-02/8-1583 сонли маълумотномаси). Тадқиқот натижалари клинкер тайёрловчи ускуна фаолиятининг берилган режимида цемент зарралари ва ёниш маҳсулотларининг атмосфера чегаравий қатламидаги концентрациясини башоратлаш аниқлигини 10-12% га ошириш имконини берган;

кичик ўлчамли зарралар чўкиш тезлигининг ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда аэрозол чиқиндиларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик ва дастурий таъминоти «Жомбой Дон Маҳсулотлари» МЧЖ да жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2019 йил 23 декабрдаги 33-8/9025 сонли маълумотномаси, Ўзбекистон Республикаси Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитасининг 2019 йил 22 ноябрдаги 02-02/8-1583 сонли маълумотномаси). Тадқиқот натижалари атмосферанинг чегаравий қатламида ва ер юзаси сатҳида донли, унли ва омухта емли зарраларнинг концентрациясини башоратлаш аниқлигини 11-13% га оширган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари, жумладан 11 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Тадқиқот мавзуси бўйича жами 33 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, 7 та хорижий ва 3 та республика журналларида нашр қилинган, шунингдек ЭҲМ учун дастурий маҳсулот қайд этилганлиги ҳақида 3 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 115 саҳифани ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг Ўзбекистон Республикаси фани ва технологиялари ривожланишининг 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 «**Атмосферага зарарли моддалар тарқалиши жараёнининг ҳозирги ҳолати ва адабиётларнинг шарҳи бўйича таҳлили**» деб номланган биринчи боби уч параграфдан иборатдир.

Биринчи параграфда атмосферада зарарли моддалар ва кичик зарраларнинг тарқалиш жараёнини математик моделлаштириш бўйича сўнгги йиллар давомида олиб борилган тадқиқотлар ва эришилган асосий назарий ва амалий натижалар батафсил таҳлил этилган. Иккинчи параграфда атмосферадаги зарарли чиқиндиларнинг характеристикалари ва асосий ифлосланиш манбалари кўриб чиқилган ва Ер сатҳи яқинида тоза атмосфера ҳавосининг кимёвий таркиби келтирилган. Бобнинг учинчи параграфида ушбу муаммо бўйича илмий манбааларни батафсил таҳлил қилиш асосида тадқиқот мақсади ва вазифалар белгиланган.

Диссертация ишининг «**Атмосферада зарарли моддалар тарқалиш жараёнини математик моделлаштириш**» деб номланган иккинчи боби субстанциянинг атмосфера чегаравий қатламида ностационар кўчиши жараёни математик моделини ишлаб чиқиш ва тадқиқ этишга бағишланган.

Бошқа муаллифларнинг кўплаб тадқиқотларида заррачалар чўкиш тезлиги ўзгармас катталиқ деб қаралганидан фарқли равишда, мазкур ишда ифлослантирувчи моддаларнинг атмосферада тарқалиши жараёнига ушбу параметр аҳамиятли таъсир кўрсатиши ва у ўзгарувчан катталиқ эканлиги ҳисобга олинган. Ўз навбатида чўкиш тезлиги кичик ўлчовли зарраларнинг физикавий-механик хоссаларидан боғлиқ.

Атмосферада аэрозол зарраларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларининг муҳим параметр – кичик ўлчамли зарраларнинг чўкиш тезлиги  $w_g$  ни ҳисобга олган ҳолда тадқиқ қилиш учун гидромеханика қонунлари асосида математик модель ишлаб чиқилди:

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

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{mg - 6\pi\gamma r w_g - 0,5c\rho_s w_g^2}{m} \quad (2)$$

ва унинг бошланғич ва чегаравий шартлари шакллантирилди:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta); \quad (4)$$

$$-\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta\theta - f_0); \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(\theta_E - \theta). \quad (5)$$

Бу ерда  $\theta$  – зарарли моддаларнинг атмосферадаги концентрацияси;  $\theta^0$  – зарарли моддаларнинг атмосферадаги бошланғич концентрацияси;

$\theta_E$  – масала ечими соҳасидан ташқарида зарарли моддаларнинг концентрацияси;  $u, w$  –  $x, z$  йўналишларида шамол тезлиги;  $w_g$  – заррачаларнинг чўкиш тезлиги;  $\sigma$  – зарарли моддаларнинг атмосферада ютилиши коэффиценти;  $\mu, \kappa$  – диффузия ва турбулентлик коэффицентлари;  $Q$  – манбаанинг қуввати;  $\delta$  – Дирак функцияси;  $\zeta$  – ҳисоб чегараси орқали ташқи муҳит билан масса алмашинув коэффиценти;  $\beta$  – ер сатҳи билан таъсирлашиш коэффиценти;  $f_0$  – зарарли модданинг ер сатҳидан атмосферага ташланиш жадаллиги;  $c=0.5$  – ўлчовсиз катталиқ;  $\rho$  – заррачанинг зичлиги;  $r$  – заррачанинг радиуси;  $s$  – заррачанинг кўндаланг кесим юзаси;  $g$  – эркин тушиш тезланиши;  $m$  – заррачанинг массаси;  $\gamma$  – заррачанинг солиштирма оғирлиги.

Таъкидлаш жоизки, (1)-(2) тенгламалар ва уларнинг бошланғич ва чегаравий шартларида (3)-(5) учта физикавий жараён ҳисобга олинган: атмосферада аэрозол зарраларнинг конвектив кўчиши, диффузион тарқалиши ва атмосфера таркибидаги намлик ҳисобига аэрозол зарраларнинг ютилиши.

Зарралар чўкиши тезлигини аниқлашда атмосферада ҳаракатланаётган заррага таъсир этувчи уч асосий куч: оғирлик кучи, сиқиб чиқарувчи куч ва қаршилиқ кучи ҳисобга олинган.

Ечишни осонлаштириш учун (1)-(5) масалани тўғри тўртбурчакли  $D = (0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq H_z)$  соҳада қараймиз, ифлосланиш манбаини эса ернинг юза қатламида жойлашган деб қабул қиламиз. Унда (1)-(5) масалани сонли ечиш учун номаълумнинг ўзгариш майдонини чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда  $\Delta x, \Delta z, \Delta t$  қадамларга мос тўр билан қолаймиз:

$$\Omega_{xzt} = \left\{ (x_i = i\Delta x, z_k = k\Delta z, \tau_n = n\Delta t); i = \overline{1, N_x}, k = \overline{1, L_z}, n = \overline{0, N_t}, \Delta t = \frac{1}{N_t} \right\}.$$

Вақт ва фазо ўзгарувчилари бўйича аппроксимациянинг юқори тартибини, шунингдек ҳисоблаш жараёнининг турғунлигини таъминлаш учун  $(w - w_g) < 0$  ҳолида ошқормас айирмали схемадан фойдаланамиз:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^n}{\Delta t / 2} + \frac{1}{2} \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i+1,j}^n}{\Delta t / 2} + \frac{1}{2} u \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{1}{2} u \frac{\theta_{i,j}^n - \theta_{i-1,j}^n}{\Delta x} + \\ & + (w - w_g) \frac{\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j}^n}{\Delta z} + \sigma \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\mu}{\Delta x^2} \left( \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \\ & + \frac{1}{\Delta z^2} \left( k_{i,j+0.5} \theta_{i,j+1}^n - (k_{i,j+0.5} + k_{i,j-0.5}) \theta_{i,j}^n + k_{i,j-0.5} \theta_{i,j-1}^n \right) + \frac{1}{2} Q_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Ўхшаш ҳадларни ихчамлаб, (6) тенгламани қуйидагича ёзамиз:

$$a_{i,j} \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}.$$

Бу ерда

$$a_{i,j} = \frac{u}{2\Delta x} + \frac{\mu}{\Delta x^2}; \quad b_{i,j} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{u}{2\Delta x} + \sigma + \frac{2\mu}{\Delta x^2}; \quad c_{i,j} = \frac{\mu}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta t};$$

$$d_{i,j} = \frac{u}{2\Delta x} \theta_{i-1,j}^n + \left( \frac{1}{\Delta t} - \frac{u}{2\Delta x} + \frac{w-w_g}{\Delta z} - \frac{k_{i,j-0,5} + k_{i,j+0,5}}{\Delta z^2} \right) \theta_{i,j}^n -$$

$$- \frac{1}{\Delta t} \theta_{i+1,j}^n + \frac{k_{i,j-0,5}}{\Delta z^2} \theta_{i,j-1}^n + \left( \frac{k_{i,j+0,5}}{\Delta z^2} - \frac{w-w_g}{\Delta z} \right) \theta_{i,j+1}^n + \frac{1}{2} Q_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}.$$

Шунга ўхшаш  $(w-w_g) > 0$  ҳол учун ҳам дифференциал операторларни чекли айирмаларда аппроксимация қиламиз ва ҳайдаш усули билан ечиш мумкин бўлган уч диагоналли чизиқли алгебраик тенгламалар тизимини ҳосил қиламиз.

Чегаравий (4) шартларни иккинчи тартибли аниқликдаги чекли айирмаларга алмаштирамиз ва ҳисоблаш учун қуйидаги формулаларни оламиз:

$$\alpha_{0,j} = \frac{4c_{1,j}\mu - b_{1,j}\mu}{3c_{1,j}\mu - a_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi}; \quad \beta_{0,j} = \frac{d_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi c_{1,j}\theta_E}{3c_{1,j}\mu - a_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi};$$

$$\theta_{N,j}^{n+1/2} = \frac{2\Delta x\xi\theta_E - (\beta_{N-2,j} + \alpha_{N-2,j}\beta_{N-1,j} - 4\beta_{N-1,j})\mu}{2\Delta x\xi + (\alpha_{N-2,j}\alpha_{N-1,j} - 4\alpha_{N-1,j} + 3)\mu}.$$

Худди шундай процедурани (5) чегаравий шартлар учун қўллаб,  $\bar{\alpha}_{i,0}, \bar{\beta}_{i,0}, \theta_{i,L}^{n+1}$  ларни ҳисоблаш учун ифодалар тузамиз.

(2) учун тенгламани чизиқли кўринишга келтириб, чекли айирмали тенгламага ўтамиз ва оралиқ натижа  $w_g^{n+1/2}$  қийматини ҳисоблаш учун ифода ҳосил қилинди:

$$w_g^{n+1/2} = \frac{m}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^n + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g}. \quad (7)$$

$w_g^{n+1}$  ни ҳисоблаш учун ҳам ўхшаш ифода тузилди:

$$w_g^{n+1} = \frac{m}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^{n+1/2} + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g}. \quad (8)$$

Олинган чекли айирмали чизиқсиз (7)-(8) тенгламалар оддий итерация усули билан ечилган. Итерацион жараённинг яқинлашиши  $|w_g^{S+1} - w_g^S| < \varepsilon$  шарт ёрдамида текширилди, бу ерда  $\varepsilon$  – итерацион жараённинг аниқлиги,  $S$  – итерациялар сони.

Зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузиясининг уч ўлчовли фазода кечиши ва турбулентлик коэффицентининг баландликка боғлиқ ўзгариши, жойнинг орографияси, шамоллар йўналиши ва қўшни ҳудудлар билан масса алмашинувини ҳисобга олган ҳолда объектнинг уч ўлчовли қўйилишдаги ишончли математик модели ишлаб чиқилди:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + u\frac{\partial\theta}{\partial x} + v\frac{\partial\theta}{\partial y} + (w-w_g)\frac{\partial\theta}{\partial z} + \sigma\theta = \mu\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\kappa\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) + \delta Q; \quad (9)$$

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{mg - 6\pi\gamma r w_g - 0,5c\rho s w_g^2}{m}, \quad (10)$$

ҳамда мос бошланғич ва чегаравий шартлар шакллантирилди:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (11)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta); \quad -\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad (12)$$

$$\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta); \quad -\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta\theta - f_0); \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(\theta_E - \theta). \quad (13)$$

Бу ерда  $u, v, w$  – шамол тезлигининг  $x, y, z$  йўналишлари бўйича ташкил этувчилари. Масалани сонли ечиш учун  $u, v, w$  функцияларни вақт бўйича қисмларда бир жинсли деб қабул қиламиз.

Сонли ечишда фазовий ўзгарувчилар бўйича аппроксимация аниқлиги тартибини ошириш мақсадида қуйидаги алмаштиришларни киритамиз:

$$\bar{w} = w - w_g; \quad \theta = e^{\frac{ux+vy+\bar{w}z}{2\mu} + \frac{\bar{w}z}{2\kappa}} \tilde{\theta}$$

ва (9)-(13) лар ўрнига қуйидагиларни ҳосил қиламиз:

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \sigma_1 \tilde{\theta} = \mu \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \right) + e_1 \delta Q; \quad (14)$$

$$\tilde{\theta}|_{t=0} = \tilde{\theta}^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (15)$$

$$-\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad \mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad -\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad (16)$$

$$\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad -\kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \tilde{\theta} - e_1 f_0); \quad \kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}). \quad (17)$$

Бу ерда

$$\sigma_1 = \frac{\kappa u^2 + \kappa v^2 + \mu \bar{w}^2 + 4\sigma \mu \kappa}{4\mu \kappa}; \quad e_1 = e^{-\left(\frac{ux+vy+\bar{w}z}{2\mu} + \frac{\bar{w}z}{2\kappa}\right)}.$$

Худди шундай (14)-(17) масалани ечиш учун алгоритм ишлаб чиқилди ва учинчи бобда батафсил келтирилди.

Ушбу бобнинг охирги параграфида атмосферада аэрозол зарраларнинг ютилиши коэффицентини ҳисоблаш учун функционал муносабат ҳосил қилинган ва боб бўйича хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг учинчи боби «**Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнлари масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари**» қўйилган масалаларни ечишнинг кам ресурс талаб этувчи ва самарали алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Уч ўлчовли (14)-(17) масалани ечиш учун иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли айирмалли схемадан фойдаланилди.

(14) тенглама  $Ox$  йўналиш бўйлаб қуйидаги тарзда аппроксимация қилинди:

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu}{\Delta x^2} \tilde{\theta}_{i-1,j,k}^{n+1/3} - \left( \frac{3}{\Delta t} + \sigma_1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^{n+1/3} + \frac{\mu}{\Delta x^2} \tilde{\theta}_{i+1,j,k}^{n+1/3} = \\
& = - \left( \left( \frac{3}{\Delta t} - \frac{2\mu}{\Delta y^2} - \frac{\kappa_{k-0,5} + \kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j-1,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j+1,k}^n + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\kappa_{k-0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k-1}^n + \frac{\kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3} e_1 \delta_{i,j,k} Q \right). \quad (18)
\end{aligned}$$

Ўхшаш ҳадларни ихчамлаб, соддалаштиргандан кейин (18) тенгламаларни чизикли алгебраик тенгламаларнинг уч диагоналли тизимига олиб келиш мумкин:

$$a_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i-1,j,k}^{n+1/3} - b_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i,j,k}^{n+1/3} + c_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i+1,j,k}^{n+1/3} = -d_{i,j,k},$$

бунда тенгламанинг коэффициентлари ва озод ҳади қуйидаги муносабатлар ёрдамида аниқланади:

$$\begin{aligned}
a_{i,j,k} &= \frac{\mu}{\Delta x^2}; \quad b_{i,j,k} = \frac{3}{\Delta t} + \sigma_1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2}; \quad c_{i,j,k} = \frac{\mu}{\Delta x^2}; \\
d_{i,j,k} &= \left( \frac{3}{\Delta t} - \frac{2\mu}{\Delta y^2} - \frac{\kappa_{k-0,5} + \kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j-1,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j+1,k}^n + \\
& \quad + \frac{\kappa_{k-0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k-1}^n + \frac{\kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3} e_1 \delta_{i,j,k} Q.
\end{aligned}$$

Чегаравий шартлар (16)  $Ox$  йўналиши бўйлаб иккинчи тартибли аниқликда аппроксимацияланди ва  $\alpha_{0,j,k}$ ,  $\beta_{0,j,k}$ ,  $\tilde{\theta}_{N,j,k}^{n+1/3}$  ларни ҳисоблаш учун муносабатлар олинди. Концентрациянинг  $\tilde{\theta}_{N-1,j,k}^{n+1/3}$ ,  $\tilde{\theta}_{N-2,j,k}^{n+1/3}$ , ...,  $\tilde{\theta}_{1,j,k}^{n+1/3}$  қийматлари тескари ҳайдаш усулида аниқланди.

Ундан кейин тенглама (14) ва чегаравий шартлар (16), (17)  $Oy$  ва  $Oz$  йўналишлари бўйлаб аппроксимацияланди ва ҳайдаш усули билан ечиладиган чизикли алгебраик тенгламалар системаси тузилди.

Тенглама (10) ни ечиш учун вақт бўйича ошқормас схемадан фойдаланилди ва қуйидагилар олинди:

а)  $Ox$  йўналиши бўйича

$$w_g^{n+\frac{1}{3}} = \frac{m}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g} w_g^n + \frac{mg \Delta t + 0,5c \rho s \Delta t \tilde{w}_g^2}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g};$$

б)  $Oy$  йўналиши бўйича

$$w_g^{n+\frac{2}{3}} = \frac{m}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g} w_g^{n+\frac{1}{3}} + \frac{mg \Delta t + 0,5c \rho s \Delta t \tilde{w}_g^2}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g};$$

в)  $Oz$  йўналиши бўйича

$$w_g^{n+1} = \frac{m}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g} w_g^{n+\frac{2}{3}} + \frac{mg \Delta t + 0,5c \rho s \Delta t \tilde{w}_g^2}{m + 6\pi kr \Delta t + c \rho s \Delta t \tilde{w}_g}.$$

Ифлослантирувчи моддалар концентрацияси мониторинги ва башоратлаш ҳудуди катта бўлганида (9)-(13) масалани ечиш учун уни

физикавий жараёнларга кўра қисмларга ажратамиз, кўчиш ва диффузия масалаларини алоҳида ечамиз.

(9)-(13) масалани сонли ечиш учун изланаётган ечимни бутун фазода силлиқ функция деб қабул қиламиз. Атмосферада массаларнинг  $t_n \leq t \leq t_{n+1}$  кичик вақт интервалида турли физикавий жараён: кўчиши ва диффузиясининг аддитивлигидан фойдаланган ҳолда биз уларни алоҳида масалалар деб қараймиз.

Субстанция траектория бўйлаб сақланган ҳолда кўчиши жараёнини (а) масала деб қабул қиламиз:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_1}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + \frac{1}{2} \sigma \theta_1 = \frac{1}{2} \delta Q \quad (19)$$

бошланғич шартни

$$\theta_1 = \theta_2^n \quad \text{при} \quad t = t_n; \quad w_g(0) \Big|_{t=t_n} = w_{g,0}(0)$$

ва чегаравий шартларни ташкил этамиз:

$$-\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad \mu \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad -\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad (20)$$

$$\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad -\kappa \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta_1 - f); \quad \kappa \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi(\theta_E - \theta_1). \quad (21)$$

Ҳаво массасида зарраларнинг атмосферада ютилишини ҳисобга олган ҳолда субстанциянинг атмосферада диффузияланишини (б) масала деб қабул қиламиз:

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma \theta_2 = \mu \left( \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \delta Q. \quad (22)$$

Бунда  $\theta_2 = \theta_1^{l+1}$  – бошланғич шарт, чегаравий шартлар эса қуйидагича бўлади:

$$-\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad \mu \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad -\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad (23)$$

$$\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad -\kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta_2 - f); \quad \kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi(\theta_E - \theta_2). \quad (24)$$

Шундай қилиб, масалани физикавий жараёнларга кўра қисмларга ажратиб, икки масалани ҳосил қилдик. Булар (а) ва (б) масалалар бўлиб, уларни бир биридан боғлиқ бўлмаган ҳолда чекли айирмали усул билан ечиш мумкин.

Физикавий жараёнларга кўра қисмларга ажратиш усули асосида масала ечиш алгоритмининг самарадорлигини баҳолаш юқорида келтирилган масалага доир дала тажриба натижалари ва бошқа сонли усуллар ёрдамида олинган натижаларни солиштириш йўли билан амалга оширилди.

Жадвалда қаралган сонли усуллар асосида ишлаб чиқилган алгоритмларнинг самарадорлик кўрсаткичлари келтирилган.



## Ҳисоблаш алгоритмларининг самарадорлик кўрсаткичлари

Кўрсаткичлар	Физик хусусиятларга мос қисмларга ажратиш усули	Иккинчи тартибли чекли-айирмали аппроксимациялаш схемаси	Ўзгарувчиларни алмаштириш усули
<b>Аниқлик (%)</b>	95,07	90,25	85,53
<b>Вақт (мс)</b>	1,2	1,5	1,9

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

Зарарли моддаларнинг атмосферада тарқалиши масаласини сонли ечишнинг физикавий қисмларга ажратиш усули натижалари табиий кузатиш натижалари билан минимал фарққа эга бўлди. Унинг аниқлиги 5-10% га катта, ҳисоблашга сарфлаган вақти эса энг кичик бўлди.

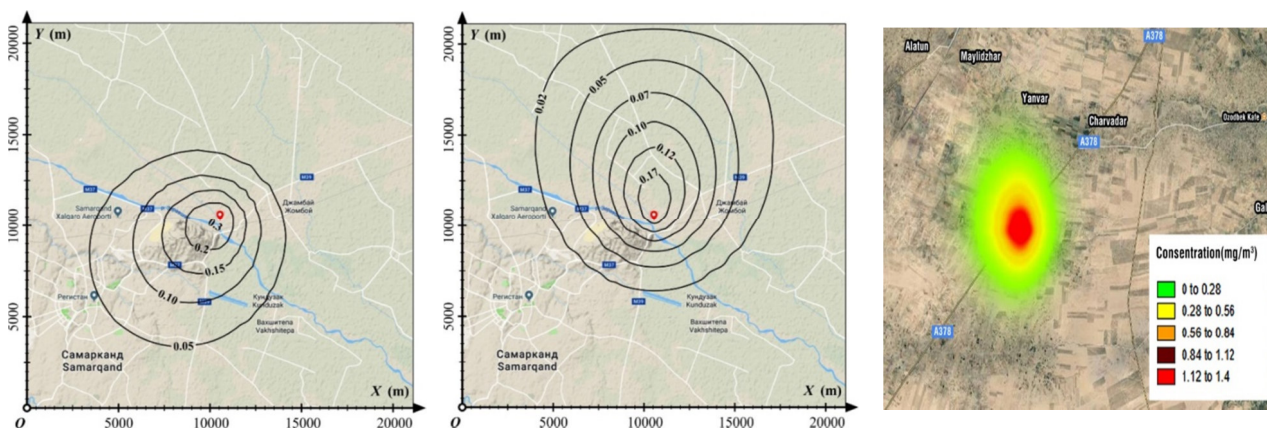
Айтиш лозимки, вақт бўйича интеграллаш қадами кичрайтирилганида алоҳида (19)-(21) ва (22)-(24) масалаларнинг ечими асосий масала (9)-(13) нинг ечимига интилади. Физикавий жараёнларга ажратиш усули яхши натижалар беришига қарамай,  $u, v, w, w_g, \mu, \kappa(z)$  параметрларнинг ўзгарувчанлиги ҳисобига қисмларга ажратилган масалалар ечимларида аниқмасликлар бўлиши мумкин.

Ишлаб чиқилган моделлар ва алгоритмларнинг амалий аспектига доир ҳисоб серияси ўтказилди ва Самарқанд вилояти Фарҳод посёлкаси яқинида жойлашган саноат корхонасидан чиқадиган аэрозол чиқиндиларнинг тарқалиши баҳоланди.

Ҳисоблашларда объектнинг реал параметрларидан фойдаланилди. Жумладан, манбаа қуввати – секундига  $50 \text{ мг/м}^3$ , ташловчи қувур баландлиги – 100 м, цемент чангининг РЭМ –  $0,3 \text{ мг/м}^3$  – бир маротабалик максимал концентрация ва  $0,1 \text{ мг/м}^3$  – суткалик ўртача концентрация. 1-расмда Ер юзасидан 200 м баландликда цемент чангининг зарралари концентрацияси 4 соатлик вақтда шамолнинг турли тезликлари ва йўналишлари учун келтирилган.

Сонли тажриба натижаларига кўра, аэрозоллар концентрациясининг атмосферада ўзгариши заррачаларнинг атмосферада ютилиши коэффициентидан аҳамиятли боғлиқ бўлади. Зарарли аэрозол заррачаларнинг максимал ютилиши сутканинг эрталабки ва кечкурунги вақтларида рўй беради. Аэрозол заррачаларнинг атмосферада тарқалиши ва жамланишига таъсир кўрсатувчи энг аҳамиятли параметрлар – шамолнинг йўналиши ва унинг горизонтал ва вертикал ташкил этувчилар, шунингдек заррачаларнинг чўкиш тезлигидир. Шамол тезлигининг ортиши билан кўчиш ҳисобига аэрозол заррачаларнинг манбаа атрофидаги концентрацияси пропорционал тарзда камаяди, заррачаларнинг кўчиши соҳаси эса вақт ўтиши билан кенгайиб боради. Атмосферада аэрозол заррачаларнинг максимал

жамланиши 200-350 м баландлик сатҳида кузатилади. Ифлосланиш концентрацияси манбаадан узоклашган сари экспоненциал камаяди. Зарарли заррачаларнинг максимал концентрацияси атмосферадаги кўчиш шлейфининг ўқ қисмида, манбаадан 10 км гача бўлган масофада кузатилиши мумкин. Атмосферага ташланаётган ифлослантирувчини текшириш билан ўтказилган сонли тажриба натижаларини солиштириш, шунингдек аниқланган қонуниятлар бошқа муаллифларнинг ишларида келтирилганлар билан етарли даражадаги мосликка эга эканлигини кўрсатди.



**1-расм. Шамолнинг турли йўналишлари ва тезликларида 4 соатдан кейин 200 м баландликдаги цемент чанги майда заррачаларининг концентрацияси**

Диссертациянинг тўртинчи «Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси масалаларини ечиш мақсадида ЭХМ да ҳисоблаш тажрибаларини олиб бориш учун дастурий инструментал комплекс» бобида ишлаб чиқилган математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари асосида саноат ҳудудларининг ҳаво ҳавзаларини мониторинг қилиш ва башоратлаш масалалари учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилган.

Дастурий мажмуа ишлаб чиқиш дастурий таъминот яратишнинг замонавий технологияларидан фойдаланиб амалга оширилган, бир-бирини тўлдирувчи қатор дастурий воситаларни ўз ичига олган.

«AIR SCREEN» дастур жараёнга таъсир этувчи иқлимий маълумотлар, ҳудуд орографияси, ернинг юза қатлами характеристикалари ва умумий жараёнга таъсир қилувчи бошқа ўзгаришларга боғлиқ равишда атмосферада аэрозолларнинг динамик тарқалишини кузатиб бориш имконини беради. У C# дастурлаш тилининг Embarcadero Rad Studio муҳитида яратилган.

Ифлослантирувчиларнинг саноат ҳудудларидаги концентрацияларини тадқиқ этиш, баҳолаш ва башоратлаш учун яратилган дастур республиканинг саноат ҳудудлари атмосферасида ва ер сатҳида зарарли моддалар миқдорини башоратлаш ва аниқлашга йўналтирилган. Ушбу дастур C++ дастурлаш тилининг Embarcadero Rad Studio муҳитида яратилган ва ҳисоб ишлари олиб боришдан ташқари у натижаларни визуаллаштириши ва таҳлил қилиш учун ташқи иловаларга, жумладан MS Excelга узатиши мумкин.

Form1

Azot oksid  Shamol tezligini kiriting  Gorizontal koordinatani kiriting

Manbaalar sonini kiriting  Shamolning esiah burchegini kiriting  Zarrachaning qo'nish tezligi, wg-

Masala raqami  Stratifikatsiya raqamini kiriting  Hisob vaqti

Yutish koeffitsiyenti

	Vertikal balandlik	OY o'q bo'yicha nuqta	OX o'q bo'yicha nuqta	Manbaa quvvati
1	1,0	11,0	11,0	100,0
2	1,0	16,0	16,0	50,0

**2-расм. Дастлабки маълумотларни киритиш интерфейс ойнаси**

Сонли тажриба ўтказишда параметрлар сифатида диффузия коэффиценти, ҳисоблашнинг охириги вақти ва вақт интервали, ечим соҳасининг ўлчамлари, манбаалар сони ва улар эмиссиясининг катталиги қийматлари киритилади (2-расм).

Ишлаб чиқилган дастурий мажмуа саноат ҳудудларида ва экологик ҳолати ёмон территорияларнинг экологик ҳолатни кузатиш ва башоратлаш, шунингдек янги лойиҳаланаётган саноат объектларини оптимал жойлаштириш бўйича қарор қабул қилиш амалиётига қўлланилиши мумкин.

Яратилган дастурий таъминот асосан ЎзР Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитасининг жойлардаги мутахассислари, экологлари, шунингдек метеорология соҳаси мутахассислари фойдаланишига йўналтирилган.

## ХУЛОСА

«Атмосферада зарарли моддаларнинг кўчиши ва диффузияси жараёнларини башоратлаш учун моделлар, алгоритмлар ва дастурлар мажмуи» мавзусида олиб борилган диссертация тадқиқотининг асосий натижалари куйидагилардан иборат:

1. Атмосферада зарарли моддалар ва кичик ўлчамли зарраларнинг атмосферада тарқалиши жараёнининг математик моделларини ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилиш билан боғлиқ адабий манбаалар батафсил ўрганилиб чиқилди.

2. Атмосферага чиқарилувчи зарарли чиқиндиларнинг классификацияси тузилди, асосий манбаалари таҳлил қилинди ва таснифлари келтирилди ва улар зарарли моддаларнинг атмосферада кўчиши ва диффузияси жараёнини математик моделлаштириш учун ахборот таъминоти бўлиб хизмат қилишди.

3. Саноат ҳудудлари атмосферасининг ҳолатини текшириш, кузатиш ва башоратлаш учун заррачаларни чўкиш тезлигининг ўзгарувчанлиги, зарарли моддалар интенсив ютилишининг суткалик ва йиллик ўзгариш характерларини ҳисобга олган ҳолда атмосферанинг чегаравий қатламида зарарли моддаларнинг тарқалиш жараёнининг икки ва уч ўлчовли чизиксиз математик моделлари ишлаб чиқилди.

4. Кўчиш тезлигининг ўзгармас ҳоли учун зарарли моддаларнинг атмосферада тарқалиши масаласини ечишнинг алмаштиришлар орқали конвектив ташкил этувчиларни йўқотишга асосланган алгоритми, тезликнинг ўзгарувчан ҳолати учун эса тенгламани физикавий жараёнлар бўйича ажратишга асосланган, ҳисоблаш вақтини аҳамиятли қисқартирадиган алгоритмлар ишлаб чиқилди.

5. Атмосферада аэрозолларнинг кўчиши ва турбулент диффузияси жараёнларининг икки ва уч ўлчовли масалаларини ечиш учун консервативликни, вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан иккинчи тартибли аппроксимация аниқлигини таъминловчи сонли усуллар яратилди.

6. Об-ҳаво, иқлимий омилларига боғлиқ равишда атмосферада зарарли моддалар тарқалишининг қатор хусусиятлари аниқланди. Жумладан, зарарли моддаларнинг максимал концентрацияси 200-350 метр баландликда, шлейф узунлиги эса 10 км гача етиши кузатилди. Ўзбекистон Республикасининг саноат ҳудудларида зарарли моддаларнинг суткалик ютилиши ўртача 10-18% ни, ҳавонинг юқори намлигида эса 70-80% ни ташкил этади.

7. ГАТ технологиялари элементларидан фойдаланиш имконига эга қилиб яратилган дастурий воситалар Самарқанд вилоятидаги айрим объектлар саноат чиқиндиларининг ҳудуд экологик ҳолатига таъсирини баҳолашда қўлланилди. Улардан фойдаланиш атроф-муҳит муҳофазасига тегишли чора-тадбирларга доир бошқарув қарорларини қабул қилишга кўмаклашади.

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

---

**НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-  
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**МУРАДОВ ФАРРУХ АБДУКАХАРОВИЧ**

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ  
ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

**Ташкент – 2020**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2017.3.PhD/Т453.**

Диссертация выполнена в Научно-инновационном центре информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий.

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.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

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

**Официальные оппоненты:** **Полатов Асхад Мухамеджанович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Исомиддинов Анвар Иномжонович**  
доктор философии по техническим наукам

**Ведущая организация:** Институт механики и сейсмостойкости сооружений

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г. в \_\_\_\_ часов на заседании научного совета DSc.13/30.12.2019.Т.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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.  
(реестр протокола рассылки №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.)

**Р.Х. Хамдамов**

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

**Ф.М. Нуралиев**

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

**М.Б. Хидирова**

Председатель научного семинара при научном совете  
по присуждению ученых  
степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

## **ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации доктора философии(PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире значительное внимание уделяется вопросам разработки математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и программного обеспечения, ориентированных на поддержку принятия решений по охране окружающей среды и ее защиты от антропогенного воздействия. Особый теоретический и практический интерес, в частности, вызывает решение задач мониторинга и прогнозирования процесса распространения вредных веществ в пограничном слое атмосферы. Проблемы разработки математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для оперативного мониторинга и оценки распределения концентрации загрязнителей в атмосфере актуальны в промышленно развитых странах мира, таких как США, Канада, Великобритания, страны Евросоюза, Российская Федерация, Индия, Китай и др.

В мире активно проводятся научные исследования, ориентированные на разработку более совершенных математических моделей процессов транспорта и диффузии вредных антропогенных и природных выбросов в атмосферу. При создании математического аппарата указанной проблемы, в частности, особое внимание уделяется таким важным аспектам, как учет погодно-климатических характеристик и орографии рассматриваемых территорий, эмиссии вредных частиц в атмосферу с поверхности земли вследствие турбулентного движения воздушной массы, изменений скорости осаждения мелкодисперсных частиц в зависимости от их физико-механических свойств.

В Республике Узбекистан не менее активно ведутся широкомасштабные исследования процессов изменения сложившихся экосистем под воздействием вредной антропогенной нагрузки, а также возможных негативных последствий экологического дисбаланса. Наряду с этим проводятся исследования в области разработки новых и усовершенствования существующих математических моделей, численных алгоритмов для мониторинга и прогнозирования процессов переноса и диффузии вредных аэрозольных выбросов в атмосферу, имеющих как техногенное, так и природное происхождение. В Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Узбекистана в 2017-2021 годах определены такие задачи, как «... обеспечение экологической безопасности проживания людей, ... предотвращение экологических проблем, наносящих урон состоянию окружающей среды, здоровью и генофонду населения, ... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления, ... сокращение вредных выбросов в атмосферу»<sup>1</sup>. Успешную реализацию этих мер невозможно представить без решения задач разработки адекватных математических моделей,

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан».

вычислительных алгоритмов и автоматизированных систем для оперативного мониторинга и прогнозирования процесса распространения вредных выбросов в атмосфере с учётом разнообразных факторов, действующих на исследуемый процесс на основе современных информационных технологий.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит реализации задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № УП-5024 от 21 апреля 2017 года «О совершенствовании системы государственного управления в сфере экологии и охраны окружающей среды», Постановлением Кабинета Министров № 310 от 23 мая 2017 года «Об утверждении Положения о Государственном комитете Республики Узбекистан по экологии и охране окружающей среды» и № 737 от 5 сентября 2019 года «О совершенствовании системы мониторинга окружающей природной среды в Республики Узбекистан», а также другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной области.

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

**Степень изученности проблемы.** Научно-исследовательские работы, ориентированные на создание и усовершенствование математических моделей, вычислительных алгоритмов и программно-инструментальных систем для мониторинга и прогнозирования процесса распространения загрязняющих выбросов в атмосферу, осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира. В частности, фундаментальные аспекты разработки и усовершенствования математических моделей сложных динамических процессов переноса и диффузии вредных веществ в пограничном слое атмосферы, а также методологии математического моделирования указанных процессов рассмотрены в работах таких ученых, как E. Naslund, L. Thaning, J. Geiser, L.C. Berselli, W.J. Layton, J.M. Germano, H. Ferziger, U. Piomelli, G.S. Winckelmans, W.C. Reynolds, Г.И. Марчук, М.И. Лунев, М.Е. Берлянд, В.В. Пененко, В.М. Белолипецкая, М.В. Меньшов, С.Г. Черный, С.В. Шаров, В.Ф. Рапута и др.

В Республике Узбекистан проблемы разработки математических моделей, вычислительных методов и алгоритмов для решения задач переноса и диффузии аэрозольных выбросов в атмосфере и защиты окружающей среды изучены в исследованиях таких ученых, как Ф.Б. Абуталиев, К.С. Каримбердиева, М.Л. Арушанов, Н. Равшанов, Ж.О. Тахиров, Б.С. Телемуратова и др.

Анализ исследований показывает, что в настоящее время недостаточно исследованы математические модели процессов переноса и диффузии аэрозольных выбросов в атмосфере в многомерной постановке с учетом изменения скорости осаждения мелкодисперсных частиц и погодно-



климатических факторов, а также вопросы разработки эффективных консервативных численных алгоритмов на основе методов с высоким порядком аппроксимации по времени и пространственным переменным.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий и Института математики АН РУз имени В.И. Романовского в рамках грантов № А-5-12 «Разработка математического обеспечения мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов» (2015-2017) и № 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).

**Цель исследования** заключается в разработке и усовершенствовании математических моделей, эффективных численных алгоритмов и программного комплекса для исследования и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов и принятия управленческих решений.

**Задачи исследования:**

создание информационной модели и базы данных для проведения комплексного исследования, прогнозирования и принятия управленческих решений по задачам оценки состояния атмосферы рассматриваемых регионов;

разработка математической модели процессов переноса и диффузии аэрозольных выбросов в атмосферу с учетом изменения скорости осаждения мелкодисперсных частиц и погоднo-климатических факторов;

усовершенствование математической модели процесса переноса и диффузии вредных аэрозольных частиц в атмосфере в трёхмерной постановке с учетом метеорологических данных;

разработка эффективного численного алгоритма для решения задач переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере, основанного на методе расщепления задачи по физическим факторам;

разработка эффективного численного алгоритма для решения задачи распространения мелкодисперсных частиц в приземном слое атмосферы со вторым порядком точности аппроксимации по времени и пространственным координатам;

разработка программного комплекса для исследования, прогнозирования и принятия управленческих решений, а также проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ по процессу распространения вредных аэрозольных частиц в атмосфере.

**Объектом исследования** является процессы переноса и диффузии вредных аэрозольных частиц в атмосфере, выбрасываемых промышленными объектами и другими источниками загрязнения.

**Предмет исследования** – математические модели, численные алгоритмы и проблемно-ориентированные программные комплексы для проведения расчетов на ЭВМ.

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

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

разработана математическая модель процессов переноса и диффузии аэрозольных выбросов в атмосферу с учетом изменения скорости осаждения мелкодисперсных частиц и погоднo-климатических факторов;

усовершенствована математическая модель процессов переноса и диффузии вредных аэрозольных частиц в атмосфере в трёхмерной постановке с учетом погоднo-климатических факторов;

разработан эффективный численный алгоритм для решения задач переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере, обладающий высоким порядком точности по времени и пространственным переменным;

разработан численный алгоритм для решения задач переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере, основанный на методе расщепления задачи по физическим факторам.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

результаты диссертационного исследования в виде разработанных математического и программного обеспечений предназначены для оценки и прогнозирования воздействия вредных выбросов на экологическое состояние окружающей среды промышленных регионов с учетом санитарных норм, обеспечения оперативного проведения мониторинга;

разработанный математический аппарат обеспечивает более адекватное описание процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере за счет учета погоднo-климатических факторов, поглощающей способности окружающей среды, переменности скорости осаждения вредных частиц и других внешних и внутренних факторов, действующих на динамику исследуемого процесса;

создан комплекс программно-инструментальных средств для автоматизации расчетов и визуализации распределения концентрации загрязнений в пограничном слое атмосферы и подстилающей поверхности с целью поддержки принятия решений на проведение необходимых природоохранных мероприятий при экономии финансовых и трудовых затрат за счет своевременности предупреждений о негативных последствиях вредных промышленных выбросов.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается тем, что уравнения, описывающие процесс распространения аэрозольных 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 сходимость вычислительного процесса, а результаты расчётов не противоречат законам природы.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в разработке и усовершенствовании математических моделей процесса распространения вредных веществ в атмосфере, где учитываются изменения погодноклиматических факторов, коэффициенты турбулентности и поглощения, переменность скорости осаждения мелкодисперсных частиц, а также в разработке более точных и эффективных численных алгоритмов решения задач с использованием преимуществ комбинации методов: повышенного порядка аппроксимации, переменных направлений и расщепления по физическим процессам.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования выражается в разработке программного комплекса для решения задач мониторинга и прогнозирования процесса распространения твердых мелкодисперсных частиц и газовых примесей в пограничном слое атмосферы, оценки негативного воздействия вредных промышленных выбросов на окружающую среду и поддержки принятия управленческих решений с минимизацией возможных экологических рисков.

**Внедрение результатов исследования.** На основе математических моделей, вычислительных алгоритмов и комплекса программно-инструментальных средств для мониторинга и прогнозирования экологического состояния атмосферы промышленных регионов:

математическая модель и программное средство для мониторинга, прогнозирования и поддержки принятия решений по процессу распространения вредных веществ в атмосфере с учетом направления и скорости ветра, а также оптимального размещения новых промышленных предприятий внедрены в Управлении по экологии и охране окружающей среды Самаркандской области (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/9025 от 23 декабря 2019 года). Эффективность от внедрения достигается за счет увеличения точности прогнозирования и своевременности предупреждений о повышении уровня концентрации вредных веществ в окружающей среде Самаркандской области на 13-14%;

математическое и программное обеспечения для анализа, мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных аэрозольных выбросов с учетом переменной скорости осаждения мелкодисперсных частиц внедрены в ООО «Жомбой Яшил Чироклари» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/9025 от

23 декабря 2019 года, Справка Государственного комитета Республики Узбекистан по экологии и охране окружающей среды № 02-02/8-1583 от 22 ноября 2019 года). Результаты исследования позволили увеличить точность прогнозирования концентрации цементной пыли и продуктов горения (при заданных режимах функционирования клинкеров обжигательной печи) в пограничном слое атмосферы и выпавших на подстилающую поверхность на 10-12%;

математическое и программное обеспечения для анализа, мониторинга и прогнозирования процесса переноса и диффузии вредных аэрозолей с учетом переменности скорости осаждения мелкодисперсных частиц внедрены в ООО «Жомбой Дон Махсулотлари» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/9025 от 23 декабря 2019 года, Справка Государственного комитета Республики Узбекистан по экологии и охране окружающей среды № 02-02/8-1583 от 22 ноября 2019 года). Результаты исследования позволили увеличить точность прогнозирования концентрации частиц зерновой, мучной и комбикормовой пыли в приземном слое атмосферы и выпавших на подстилающую поверхность на 11-13%.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы обсуждались на 11 международных и 8 республиканских научных конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 33 научные работы, из них 10 журнальных статей, в том числе 7 в иностранных и 3 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, а также получены 3 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит 115 страниц и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и структура диссертации.

Первая глава диссертации «Современное состояние и обзор литературных источников по процессу распространения вредных веществ в атмосфере» состоит из трёх параграфов.

В первом параграфе проведен подробный обзор исследований за последние годы по математическому моделированию процесса распространения вредных веществ и мелкодисперсных частиц в атмосфере и основных полученных теоретических и прикладных результатов. Во втором параграфе приведены обзор основных источников загрязнения и характеристики вредных выбросов в атмосферу, а также химический состав чистого атмосферного воздуха у поверхности Земли. В третьем параграфе главы на основе подробного анализа литературных источников по данной проблеме сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации «Математическое моделирование процессов распространения вредных веществ в атмосфере» посвящена разработке и исследованию математических моделей нестационарного процесса переноса субстанции в пограничном слое атмосферы.

В отличие от многих исследований других авторов, когда скорость осаждения частиц полагается постоянной, исходим из того, что данный параметр существенно влияет на процесс распространения загрязнителей в атмосфере и является переменным. Скорость осаждения частиц, в свою очередь, зависит от физико-механических свойств мелкодисперсных частиц.

Для исследования процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере с учетом параметра – скорости осаждения мелкодисперсных частиц  $w_g$  – разработана математическая модель на основе законов гидромеханики:

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

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{mg - 6\pi\gamma r w_g - 0,5c\rho s w_g^2}{m} \quad (2)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=Lx} = \xi(\theta_E - \theta); \quad (4)$$

$$-\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta\theta - f_0); \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(\theta_E - \theta). \quad (5)$$

Здесь  $\theta$  – концентрация вредных веществ в атмосфере;  $\theta_0$  – первичная концентрация вредных веществ в атмосфере;  $\theta_E$  – концентрация вредных веществ за пределом области решения задачи;  $u, w$  – скорость ветра по

направлениям  $x, z$ ;  $w_g$  – скорость осаждения частиц;  $\sigma$  – коэффициент поглощения вредных веществ в атмосфере;  $\mu, \kappa$  – коэффициенты диффузии и турбулентности;  $Q$  – мощность источника;  $\delta$  – функция Дирака;  $\beta$  – коэффициент взаимодействия частиц с подстилающей поверхностью;  $\xi$  – коэффициент массообмена через границы расчета;  $f_0$  – мощность выброса вредных веществ в атмосферу с подстилающей поверхности земли;  $c$  – безразмерная величина, равная 0.5;  $\rho$  – плотность частиц;  $r$  – радиус частиц;  $s$  – площадь поперечного сечения частиц;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $m$  – масса частиц;  $\gamma$  – удельный вес частиц.

Надо отметить, что в данной постановке уравнения (1), (2) и их начальные и граничные условия (3)-(5) учитывают три физических процесса: конвективный перенос, диффузионное распространение и поглощение аэрозольных частиц за счет влагосодержания воздушной массы.

При определении скорости осаждения частиц учитываются три основные силы, которые действуют на частицы при движении в атмосфере: сила тяжести, сила выталкивания и сила сопротивления.

Для простоты решения задачи (1)-(5) область  $D = (0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq H_z)$  рассмотрим как прямоугольную, а источник загрязнения считаем расположенным в приземном слое. Тогда для численного решения задачи (1)-(5) область изменения искомых переменных с учетом граничных условий покроем сеткой с шагами  $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ :

$$\Omega_{xzt} = \left\{ (x_i = i\Delta x, z_k = k\Delta z, \tau_n = n \Delta t); i = \overline{1, N_x}, k = \overline{1, L_z}, n = \overline{0, N_t}, \Delta t = \frac{1}{N_t} \right\}.$$

Для обеспечения высокого порядка аппроксимации по времени и пространственным переменным, а также устойчивости вычислительного процесса при  $(w - w_g) < 0$  используем неявную разностную схему:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^n}{\Delta t / 2} + \frac{1}{2} \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i+1,j}^n}{\Delta t / 2} + \frac{1}{2} u \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{1}{2} u \frac{\theta_{i,j}^n - \theta_{i-1,j}^n}{\Delta x} + \\ & + (w - w_g) \frac{\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j}^n}{\Delta z} + \sigma \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\mu}{\Delta x^2} \left( \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \\ & + \frac{1}{\Delta z^2} \left( k_{i,j+0,5} \theta_{i,j+1}^n - (k_{i,j+0,5} + k_{i,j-0,5}) \theta_{i,j}^n + k_{i,j-0,5} \theta_{i,j-1}^n \right) + \frac{1}{2} Q_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее, группируя подобные члены, уравнение (6) записываем в виде

$$a_{i,j} \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j},$$

где

$$a_{i,j} = \frac{u}{2\Delta x} + \frac{\mu}{\Delta x^2}; \quad b_{i,j} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{u}{2\Delta x} + \sigma + \frac{2\mu}{\Delta x^2}; \quad c_{i,j} = \frac{\mu}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta t};$$

$$d_{i,j} = \frac{u}{2\Delta x} \theta_{i-1,j}^n + \left( \frac{1}{\Delta t} - \frac{u}{2\Delta x} + \frac{w-w_g}{\Delta z} - \frac{k_{i,j-0,5} + k_{i,j+0,5}}{\Delta z^2} \right) \theta_{i,j}^n -$$

$$- \frac{1}{\Delta t} \theta_{i+1,j}^n + \frac{k_{i,j-0,5}}{\Delta z^2} \theta_{i,j-1}^n + \left( \frac{k_{i,j+0,5}}{\Delta z^2} - \frac{w-w_g}{\Delta z} \right) \theta_{i,j+1}^n + \frac{1}{2} Q_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}.$$

Аналогично при  $(w-w_g) > 0$  аппроксимируем дифференциальные операторы на конечно-разностные и получаем трехдиагональную систему линейных алгебраических уравнений, которая решается методом прогонки.

Далее заменяем краевые условия (4) на конечно-разностные со вторым порядком точности и получаем формулы для вычисления:

$$\alpha_{0,j} = \frac{4c_{1,j}\mu - b_{1,j}\mu}{3c_{1,j}\mu - a_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi}; \quad \beta_{0,j} = \frac{d_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi c_{1,j}\theta_E}{3c_{1,j}\mu - a_{1,j}\mu + 2\Delta x\xi};$$

$$\theta_{N,j}^{n+1/2} = \frac{2\Delta x\xi\theta_E - (\beta_{N-2,j} + \alpha_{N-2,j}\beta_{N-1,j} - 4\beta_{N-1,j})\mu}{2\Delta x\xi + (\alpha_{N-2,j}\alpha_{N-1,j} - 4\alpha_{N-1,j} + 3)\mu}.$$

Аналогичная процедура применяется для краевых условий (5), и составляются выражения для вычисления  $\bar{\alpha}_{i,0}$ ,  $\bar{\beta}_{i,0}$ ,  $\theta_{i,L}^{n+1}$ .

Линеаризуя уравнение (2), переходим к конечно-разностному уравнению и получаем выражение для вычисления промежуточного результата по  $w_g^{n+\frac{1}{2}}$ :

$$w_g^{n+\frac{1}{2}} = \frac{2m}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^n + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g}. \quad (7)$$

Для вычисления  $w_g^{n+1}$  получаем аналогичное выражение:

$$w_g^{n+1} = \frac{2m}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^{n+\frac{1}{2}} + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{2m + 6\pi\gamma r\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g}. \quad (8)$$

Полученные конечно-разностные нелинейные уравнения (7), (8) решены методом простой итерации. Сходимость итерационного процесса проверяется по условию  $|w_g^{S+1} - w_g^S| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – точность итерационного процесса;  $S$  – число итераций.

С учетом трехмерности переноса и диффузии вредных веществ и переменности коэффициента турбулентности по высоте, с увязкой к орографии местности, розе ветров и массообмену с прилегающими регионами, разработана более адекватная математическая модель объекта в трехмерной постановке:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + u\frac{\partial\theta}{\partial x} + v\frac{\partial\theta}{\partial y} + (w-w_g)\frac{\partial\theta}{\partial z} + \sigma\theta = \mu\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\kappa\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) + \delta Q; \quad (9)$$

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{mg - 6\pi\gamma r w_g - 0,5c\rho s w_g^2}{m} \quad (10)$$

с соответствующими им начальными и граничными условиями:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (11)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta); \quad -\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta); \quad (12)$$

$$\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta); \quad -\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta\theta - f_0); \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(\theta_E - \theta). \quad (13)$$

Здесь  $u, v, w$  – составляющие скорости ветра по трем направлениям  $x, y, z$ . Для численного решения задачи предположим, что функции  $u, v, w$  по времени кусочно-однородные.

При численном решении задачи с целью повышения порядка аппроксимации по пространственным переменным вводим следующие замены:

$$\bar{w} = w - w_g, \quad \theta = e^{\frac{ux+vy}{2\mu} + \frac{\bar{w}z}{2\kappa}} \tilde{\theta}$$

и вместо (9)-(13) получаем

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \sigma_1 \tilde{\theta} = \mu \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \right) + e_1 \delta Q; \quad (14)$$

$$\tilde{\theta}|_{t=0} = \tilde{\theta}^0; \quad w_g|_{t=0} = w_g^0; \quad (15)$$

$$-\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad \mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad -\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad (16)$$

$$\mu \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}); \quad -\kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \tilde{\theta} - e_1 f_0); \quad \kappa \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi(e_1 \theta_E - \tilde{\theta}), \quad (17)$$

где

$$\sigma_1 = \frac{\kappa u^2 + \kappa v^2 + \mu \bar{w}^2 + 4\sigma \mu \kappa}{4\mu \kappa}; \quad e_1 = e^{-\left(\frac{ux+vy}{2\mu} + \frac{\bar{w}z}{2\kappa}\right)}.$$

Для решения задачи (14)-(17) разработан алгоритм, который подробно описан в третьей главе.

В последнем параграфе данной главы получена функциональная зависимость для вычисления коэффициента поглощения аэрозольных частиц в атмосфере и приведены выводы по главе.

Третья глава диссертации «**Эффективные численные алгоритмы для решения задач процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере**» посвящена разработке экономичных и производительных алгоритмов решения поставленных задач.

Для решения трехмерной задачи (14)-(17) используем неявную конечно-разностную схему по времени со вторым порядком аппроксимации.

По направлению  $0x$  уравнение (14) аппроксимируем следующим образом:



$$\begin{aligned}
& \frac{\mu}{\Delta x^2} \tilde{\theta}_{i-1,j,k}^{n+1/3} - \left( \frac{3}{\Delta t} + \sigma_1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^{n+1/3} + \frac{\mu}{\Delta x^2} \tilde{\theta}_{i+1,j,k}^{n+1/3} = \\
& = - \left( \left( \frac{3}{\Delta t} - \frac{2\mu}{\Delta y^2} - \frac{\kappa_{k-0,5} + \kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j-1,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j+1,k}^n + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\kappa_{k-0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k-1}^n + \frac{\kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3} e_1 \delta_{i,j,k} Q \right). \quad (18)
\end{aligned}$$

Группируя подобные члены, после упрощения системы алгебраических уравнений (18) можно свести к трехдиагональной системе линейных алгебраических уравнений:

$$a_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i-1,j,k}^{n+1/3} - b_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i,j,k}^{n+1/3} + c_{i,j,k} \tilde{\theta}_{i+1,j,k}^{n+1/3} = -d_{i,j,k},$$

где коэффициенты и свободный член уравнения определяются с помощью зависимостей

$$\begin{aligned}
a_{i,j,k} &= \frac{\mu}{\Delta x^2}; \quad b_{i,j,k} = \frac{3}{\Delta t} + \sigma_1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2}; \quad c_{i,j,k} = \frac{\mu}{\Delta x^2}; \\
d_{i,j,k} &= \left( \frac{3}{\Delta t} - \frac{2\mu}{\Delta y^2} - \frac{\kappa_{k-0,5} + \kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \right) \tilde{\theta}_{i,j,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j-1,k}^n + \frac{\mu}{\Delta y^2} \tilde{\theta}_{i,j+1,k}^n + \\
& \quad + \frac{\kappa_{k-0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k-1}^n + \frac{\kappa_{k+0,5}}{\Delta z^2} \tilde{\theta}_{i,j,k+1}^n + \frac{1}{3} e_1 \delta_{i,j,k} Q.
\end{aligned}$$

Граничные условия (16) аппроксимируем по направлению  $Ox$  со вторым порядком точности и получаем соотношения для вычисления  $\alpha_{0,j,k}$ ,  $\beta_{0,j,k}$ ,  $\tilde{\theta}_{N,j,k}^{n+1/3}$ . Значения концентрации  $\tilde{\theta}_{N-1,j,k}^{n+1/3}$ ,  $\tilde{\theta}_{N-2,j,k}^{n+1/3}$ , ...,  $\tilde{\theta}_{1,j,k}^{n+1/3}$  определяются методом обратной прогонки.

Далее аппроксимируем уравнение (14) и граничные условия (16), (17) по направлениям  $Oy$  и  $Oz$  и получаем систему линейных алгебраических уравнений, которые решаются методом прогонки.

Для решения уравнения (10) используем неявную схему по времени и получаем:

а) по направлению  $Ox$  –

$$w_g^{n+\frac{1}{3}} = \frac{3m}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^n + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g};$$

б) по направлению  $Oy$  –

$$w_g^{n+\frac{2}{3}} = \frac{3m}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^{n+\frac{1}{3}} + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g};$$

в) по направлению  $Oz$  –

$$w_g^{n+1} = \frac{3m}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g} w_g^{n+\frac{2}{3}} + \frac{mg\Delta t + 0,5c\rho s\Delta t\tilde{w}_g^2}{3m + 6\pi kr\Delta t + c\rho s\Delta t\tilde{w}_g}.$$

Когда область мониторинга и прогнозирования концентрации загрязняющих веществ большая, то для решения задачу (9)-(13) расщепляем по физическим процессам и отдельно решаем задачи переноса и диффузии.

Для численного решения задачи (9)-(13) будем считать, что искомое решение – гладкая функция во всем пространстве. Используя аддитивность принципиально различных физических процессов переноса и диффузии масс в атмосфере в малом интервале времени  $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ , рассмотрим их как отдельные задачи.

Процесс переноса субстанции с ее сохранением вдоль траектории будем рассматривать как задачу (а):

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_1}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + \frac{1}{2} \sigma \theta_1 = \frac{1}{2} \delta Q \quad (19)$$

с начальными

$$\theta_1 = \theta_2^n \text{ при } t = t_n; \quad w_g(0) \Big|_{t=t_n} = w_{g,0}(0)$$

и граничными

$$-\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad \mu \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad -\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad (20)$$

$$\mu \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta_1); \quad -\kappa \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta_1 - f); \quad \kappa \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi(\theta_E - \theta_1) \quad (21)$$

условиями.

Процесс диффузии субстанции в атмосфере с учетом поглощения частиц в воздушной массе рассматриваем как задачу (б):

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma \theta_2 = \mu \left( \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \delta Q \quad (22)$$

с начальным  $\theta_2 = \theta_1^{l+1}$  и граничными

$$-\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad \mu \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad -\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad (23)$$

$$\mu \frac{\partial \theta_2}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi(\theta_E - \theta_2); \quad -\kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta_2 - f); \quad \kappa \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=H} = \xi(\theta_E - \theta_2) \quad (24)$$

условиями.

Итак, расщепляя поставленную задачу по физическим процессам, мы получили две подзадачи: подзадачу (а) и подзадачу (б), которые можно решать независимо друг от друга конечно-разностным методом.

Оценка эффективности разработанного алгоритма решения задачи на основе метода физического расщепления выполнялась путем сравнения результатов расчетов с данными полевых измерений и расчетами на основе других численных методов ее решения.

В таблице представлены показатели эффективности алгоритмов, разработанных на основе рассмотренных численных методов.

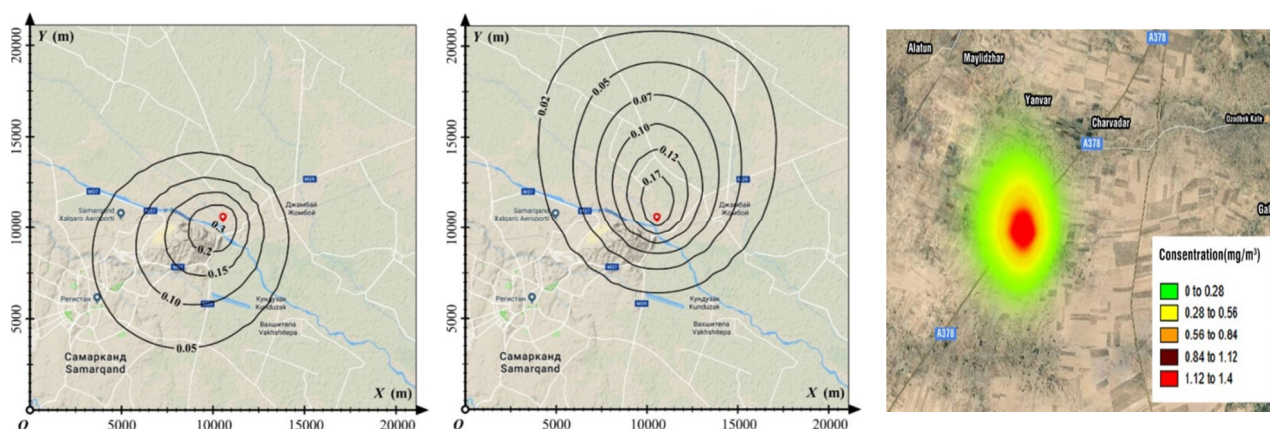
## Показатели эффективности вычислительных алгоритмов

Показатели	Метод физического расщепления	Конечно-разностная схема 2-го порядка аппроксимации	Метод замены переменных
<b>Точность, %</b>	95,07	90,25	85,53
<b>Время, мс</b>	1,2	1,5	1,9

В целом все разработанные алгоритмы показали достаточную согласованность с данными полевых измерений. Результаты же численного решения задачи распространения вредных выбросов в атмосфере методом физического расщепления имеют минимальное расхождение с данными измерений. Его точность выше на 5-10% при том, что время вычислений самое наименьшее.

Отметим, что при уменьшении шага интегрирования по времени решения отдельных задач (19)-(21) и (22)-(24) стремятся к решению основной задачи (9)-(13). Хотя метод расщепления по физическим процессам дает хорошие результаты, неточности решения расщепленных задач могут возникнуть за счет изменения параметров  $u, v, w, w_g, \mu, \kappa(z)$  как по времени, так и по пространственным переменным.

Касательно прикладных аспектов разработанных моделей и алгоритмов была проведена серия экспериментов по оценке распространения аэрозольных выбросов одного из промышленных предприятий вблизи поселка Фархад Самаркандской области. При расчетах использованы реальные входные параметры объекта, в частности мощность источника –  $50 \text{ мг/м}^3$  в с; высота устья выбросной трубы – 100 м; величина ПДК для цементной пыли составляет  $0,3 \text{ мг/м}^3$  – максимальная разовая концентрация и  $0,1 \text{ мг/м}^3$  – среднесуточная концентрация. На рис. 1 показана концентрация пыли цемента на высоте 200 м после четырех часов при различных скоростях и направлениях ветра.



**Рис. 1. Концентрация мелкодисперсных частиц цементной пыли ( $\text{мг/м}^3$ ) на высоте 200 м при  $t = 4$  ч и различных направлениях и скоростях ветра**

Вычислительными экспериментами (ВЭ) установлено, что изменение концентрации аэрозолей в атмосфере существенно зависит от коэффициента

поглощения частиц в атмосфере. При этом максимальное поглощение вредных аэрозольных частиц в атмосфере характерно для утреннего и вечернего времени суток. Другими наиболее существенными параметрами, влияющими на распространение и накопление вредных аэрозольных частиц в атмосфере, являются горизонтальная и вертикальная составляющие скорости и направления ветра, а также скорость осаждения частиц. С ростом скорости ветра за счет переноса аэрозольных частиц по горизонтали концентрация вредных веществ вокруг источника пропорционально уменьшается, а область их транспортировки со временем расширяется. Максимальное накопление аэрозольных частиц в атмосфере наблюдается на уровне 200-350 м. Концентрация загрязнений экспоненциально уменьшается по мере удаления от источника. Максимум концентрации вредных частиц наблюдается в осевой части шлейфа атмосферного переноса на расстоянии до 10 км от источника. Сравнение результатов проведенных ВЭ с данными инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а также с выявленными закономерностями в рассмотренных работах других авторов показало их достаточно удовлетворительное согласие.

В четвертой главе диссертации **«Программно-инструментальный комплекс для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ для решения задач переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере»** разработан программный комплекс для проведения ВЭ на ЭВМ по задачам мониторинга и прогнозирования воздушных бассейнов промышленных регионов на основе разработанных математических моделей и эффективных численных алгоритмов.

Разработанный программный комплекс включает в себя ряд взаимодополняющих программных средств, реализованных с использованием современных технологий разработки программного обеспечения.

Программа «AIR SCREEN» позволяет осуществлять визуальное наблюдение за динамическим распределением аэрозолей в атмосфере в зависимости от погодных-климатических данных, топографии местности, характеристики подстилающей поверхности земли и других возмущений, действующих на процесс в целом. Данная программа создана в среде Embarcadero Rad Studio на языке программирования C#.

Программа для исследования, оценки и прогнозирования концентрации загрязнителей в атмосфере промышленных регионов, главным образом, предназначена для прогнозирования и определения количества токсичных веществ в атмосферном воздухе и на подстилающей поверхности в промышленных зонах нашей республики. Разработка данной программы выполнена с помощью объектно-ориентированного языка C++ в среде разработки Embarcadero Rad Studio.

Form1

Азота оксида:  Скорость ветра:  Горизонтальная координата:

Число источника:  Направления ветра:  Скорость осаднения частиц:

Номер задачи:  Стратификация:  Время расчета:

Коэффициент поглощения:

	Вертикальная высота	Точка по ось OY	Точка по ось OX	Мощность источника
1	<input type="text" value="1,0"/>	<input type="text" value="11,0"/>	<input type="text" value="11,0"/>	<input type="text" value="100,0"/>
2	<input type="text" value="1,0"/>	<input type="text" value="16,0"/>	<input type="text" value="16,0"/>	<input type="text" value="50,0"/>

**Рис. 2. Интерфейс окна ввода исходных данных**

Данная программа, помимо выполнения расчетов, также имеет функции визуализации результатов и возможность их экспорта в сторонние приложения для анализа, например, в Microsoft Excel.

При проведении ВЭ в качестве входных параметров указываются коэффициент диффузии, конечное время расчета и временной интервал, размеры области решения задачи, количество источников и значения их мощности эмиссии.

Разработанный программный комплекс на практике может быть успешно использован для мониторинга и прогнозирования экологической ситуации в промышленных зонах и на территориях с неблагоприятной экологической ситуацией, в том числе для поддержки принятия решений по оптимизации размещения вновь проектируемых промышленных объектов.

Созданное программное обеспечение, в основном, ориентировано на использование специалистами Государственного комитета РУз по экологии и охране окружающей среды на местах, экологами, а также специалистами в области метрологии и стандартизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертационной работе на тему «Модели, вычислительные алгоритмы и программные комплексы для мониторинга и прогнозирования процессов переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере» получены следующие основные результаты:

1. Проведен подробный обзор литературных источников, связанных с разработкой и исследованием математических моделей процесса распространения вредных веществ и мелкодисперсных частиц в атмосфере.

2. Проведена классификация и дан анализ основных источников выбросов вредных загрязнений в атмосферу и их характеристик, которые необходимы для информационного обеспечения математического моделирования процесса.

3. Для исследования, прогнозирования и мониторинга состояния атмосферы промышленных регионов разработаны двух- и трехмерные нелинейные математические модели процесса распространения вредных веществ в пограничном слое атмосферы с учетом переменности скорости осаждения частиц, суточного и годового характера изменения интенсивности поглощения вредных веществ.

4. Для случая постоянных скоростей переноса разработан алгоритм решения задачи о распределении вредных веществ в атмосфере, основанный на преобразовании переменных с исключением конвективных составляющих уравнения, а для случая переменных скоростей – на расщеплении уравнения по физическим процессам, которое значительно сокращает время расчета.

5. Разработаны численные методы решения двух- и трехмерных задач переноса и турбулентной диффузии аэрозолей в атмосфере, обеспечивающие консервативность и второй порядок точности аппроксимации по времени и пространственным координатам.

6. Обнаружен ряд особенностей распространения вредных веществ в атмосфере в зависимости от погодных-климатических условий. В частности, максимальная концентрация вредных веществ наблюдается на уровне 200-350 м, а протяженность шлейфа достигает до 10 км. Для промышленных регионов Республики Узбекистан суточное поглощение вредных веществ составляет в среднем 10-18%, а при высокой влажности воздуха – 70-80%.

7. Разработанные программные продукты, которые допускают совмещение элементов ГИС-технологий, использованы при оценке влияния промышленных выбросов некоторых объектов Самаркандской области на экологическое состояние региона. Их использование способствует принятию обоснованных управленческих решений по природоохранным мероприятиям.

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

---

**SCIENTIFIC AND INNOVATION CENTER OF INFORMATION AND  
COMMUNICATION TECHNOLOGIES AT TASHKENT UNIVERSITY OF  
INFORMATION TECHNOLOGIES**

**MURADOV FARRUKH ABDUKAXAROVICH**

**MODELS, ALGORITHMS AND PROGRAM COMPLEXES FOR THE  
FORECASTING THE PROCESSES OF POLLUTANTS TRANSPORT AND  
DIFFUSION IN THE ATMOSPHERE**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

**Tashkent – 2020**

**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 B2017.3.PhD/T453.**

The dissertation has been prepared at Scientific and Innovation Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies.

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.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific adviser:** **Ravshanov Normahmad**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Officialopponents :** **Polatov Askhad Muhamedjanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Isomiddinov Anvarjon Inomjonovich**  
Doctor of Philosophy on Technical Sciences

**Leading organization:** **Institute of mechanics and seismic stability of structures**

The defense will take place “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 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 “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 y.  
(mailing report No. \_\_\_ on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 y.).

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

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

**M.B.Hidirova**  
Chairman of the academic seminar under  
the scientific council awarding scientific  
degrees, Doctor of Technical Sciences,  
senior research



## INTRODUCTION (abstract of the PhD thesis)

**The aim of the research work** is to develop and improve mathematical models, effective numerical algorithms and a software package to study and predict the ecological state of industrial regions and making managerial decisions.

**The object of the research work** is the process of harmful aerosol particles spread in the atmosphere emitted by industrial facilities and other sources of pollution.

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

a mathematical model of the process of transfer and diffusion of aerosol emissions in the atmosphere was developed taking into account the changes in deposition rate of fine particles and weather-climate factors;

a mathematical model of the process of transfer and diffusion of harmful aerosol particles in the atmosphere in a three-dimensional statement was improved, taking into account weather-climate factors;

an effective numerical algorithm was developed to solve the problem of transfer and diffusion of aerosol particles in the atmosphere; it has a high order of accuracy in time and spatial variables;

a numerical algorithm was developed to solve the problem of transfer and diffusion of aerosol particles in the atmosphere, based on the method of problem splitting into physical factors.

**Implementation of the research results.** Based on mathematical models, computational algorithms and a software package for monitoring and predicting the ecological state of the atmosphere in industrial regions the following results were implemented:

Mathematical and software package for analyzing, monitoring and predicting the process of transfer and diffusion of harmful aerosol emissions, accounting for the deposition rate of fine particles, was implemented at Zhomboy Yashil Chiroklari LLC (Certificate of the Ministry of Information Technology and Communications Development No. 33-8 / 9025 of December 23, 2019, Certificate of the State Committee of the Republic of Uzbekistan on Ecology and Environmental Protection No. 02-02 / 8-1583 of November 22, 2019). The results of the study made it possible to increase by 10-12% the accuracy of predicting the concentration of cement dust;

mathematical and software package for analyzing, monitoring and predicting the process of transfer and diffusion of harmful aerosols with account for the variability of the deposition rate of fine particles was implemented at Zhomboy Don Makhsulotlari LLC (Certificate of the Ministry of Information Technology and Communications Development No. 33-8 / 9025 of December 23, 2019, Certificate of the State Committee of the Republic of Uzbekistan on Ecology and Environmental Protection No. 02-02 / 8-1583 dated November 22, 2019). The results of the study made it possible to increase by 11-13% the accuracy of predicting the concentration of particles of grain;

a mathematical model and software package for monitoring, forecasting and decision-making on the process of harmful substances spread in the atmosphere, accounting for the wind velocity and direction, as well as the optimal location of new industrial enterprises, were implemented in the Department of Ecology and Environmental Protection of the Samarkand Region (Certificate of the Ministry of Information Development Technologies and Communications No. 33-8 / 9025 of December 23, 2019). Efficiency from implementation was achieved by increasing by 13-14% the accuracy of forecasting and the timely warnings about increased level of concentration of harmful substances in the environment of the Samarkand region.

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

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Ravshanov N., Muradov F., Akhmedov D. Mathematical software to study the harmful substances diffusion in the atmosphere // Ponte. – 2018. – vol. 74, № 8/1. – pp. 171-179. (№1; Web of Science; IF=0.814).

2. Sharipov D., Muradov F., Akhmedov D. Numerical Modeling Method for Short-Term Air Quality Forecast in Industrial Regions // Applied Mathematics E-Notes. – 2019. – № 19. – pp. 575-584. (№3; Scopus; IF=0.28).

3. Ravshanov N., Muradov F., Akhmedov D. Operator splitting method for numerical solving the atmospheric pollutant dispersion problem // Journal of Physics: Conference Series. London, 2020. Vol. 1441. 012164. (№3; Scopus; IF=0.54).

4. Muradov F., Akhmedov D. Numerical Modeling of Atmospheric Pollutants Dispersion Taking Into Account Particles Settling Velocity // IEEE International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). 4-6 Nov. 2019. – Tashkent, 2019. – pp. 1-5. ((№3; Scopus; IF=0.46).

5. Мурадов Ф.А. Численное моделирование рассеивания вредных примесей в приземном слое атмосферы с учетом скорости осаждения частиц // Информационные технологии моделирования и управления. – 2019. – № 3(117). – С. 206-216. (05.00.00; № 43).

6. Мурадов Ф.А., Равшанов З.Н. Математическое обеспечение и веб-приложение для мониторинга и прогнозирования экологического состояния атмосферы промышленных регионов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2017. – № 6(108). – С. 451-459. (05.00.00; № 43).

7. Равшанов Н., Мурадов Ф.А. Модель и численный алгоритм процесса переноса и диффузии активных мелкодисперсных частиц в атмосфере // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж: Научная книга, 2017. – № 2(104). – С. 132-142. (05.00.00; № 43).

8. Шарипов Д.К., Мурадов Ф., Равшанов З.Н. Математическая модель и вычислительный эксперимент для мониторинга и прогнозирования экологического состояния пограничного слоя атмосферы // Проблемы вычислительной и прикладной математики. - Ташкент, 2017. - № 6(12). - С. 15-28. (05.00.00; № 23).

9. Равшанов Н., Мурадов Ф., Нарзуллаева Н., Морзицин И. Компьютерное моделирование процесса распространения вредных аэрозольных частиц в пограничном слое атмосферы // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2017. - № 2. - С. 20-29. (05.00.00; № 23).

10. Равшанов Н., Таштемирова Н., Мурадов Ф. Исследование существования и единственности решения задачи переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2017. – № 1(7). – С. 54-67. (05.00.00; № 23).

### **II бўлим (II часть; II part)**

11. Равшанов Н., Мурадов Ф.А., Набиулина Л.М. Численное моделирование процесса переноса и диффузии активных аэрозольных частиц в пограничном слое атмосферы // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2016. - № 2. - С. 47-58.

12. Ravshanov N., Sharipov D., Muradov F. Computational experiment for forecasting and monitoring the environmental condition of industrial regions // Theoretical & Applied Science : International Scientific Journal. – 2016. – vol. 35. – Issue 3. – pp. 132-139. – DOI: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2016.03.35.22>.

13. Мурадов Ф.А., Равшанов З.Н. Математическая модель и вычислительный эксперимент для прогнозирования экологического состояния атмосферы регионов // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы 18-й Международной конференции. 8-9 февраля 2018. - Воронеж, 2018. – Т. 5. – С. 191-195.

14. Мурадов Ф.А., Равшанов З.Н. Захарли моддаларнинг атмосферада тарқалишини башоратлаш ва мониторинг қилиш учун математик таъминоти // Proceedings of the International Scientific-Practical and Spiritual-Educational Conference. April 5-6, 2018. – Tashkent: TUIT, 2018. – pp. 117-120.

15. Мурадов Ф.А., Нарзикулов З.Х. Захарли моддаларнинг атмосферада тарқалишини башоратлаш ва мониторинг қилиш учун математик ва дастурий таъминоти // Фарғона водийси худудларидаги маҳаллий хом-ашёлардан фойдаланиш асосида импорт ўрнини босувчи маҳсулотлар ишлаб чиқаришининг долзарб масалалари: Халқаро конференция материаллари. – Наманган, 2018. – Б. 168-171.

16. Равшанов Н., Мурадов Ф., Нарзуллаева Н. Модель и программные средства для прогнозирования экологического состояния промышленных регионов // Иқтисодийнинг реал тармоқларини инновацион ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти: Республика илмий-техник анжумани материаллари. – Тошкент, 2017. – С. 250-252.

17. Равшанов, Н., Мурадов Ф., Нарзуллаева Н. Модель и программно-инструментальный комплекс для мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов // Всемирный день охраны окружающей среды (Экологические чтения – 2017): Материалы Международной научно-практической конференции. 3-5 июня 2017. – Омск: Литера, 2017. – С. 233-236.

18. Равшанов Н., Мурадов Ф., Ахмедов Д.Д. Математическое и программное обеспечение для прогнозирования экологического состояния атмосферы промышленных регионов // Информатика: проблемы,

методология, технологии: Материалы XIX Международной научно-методической конференции. 14-15 февраля 2019. - Воронеж, 2019: Воронежский государственный университет, Научно-исследовательские публикации (ООО «Вэлборн»), 2019. – С. 148-153.

19. Мурадов Ф.А., Ахмедов Д.Д. Моделирование процесса распространения аэрозолей в приземном слое атмосферы с учетом скорости осаждения частиц // Экологические чтения – 2019: Материалы X Национальной научно-практической конференции с международным участием. – Омск, 2019. – С. 271-276.

20. Мурадов Ф.А., Мирбабаев Ш.Р. Атмосферада зарарли моддаларнинг тарқалишини башоратлаш ва кузатиш учун дастурий восита яратиш // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар: Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман материаллари. 27-28 май 2020. - Андижон, 2020. – Б. 65-68.

21. Мурадов Ф.А., Мирбабаев Ш.Р. Атмосферанинг чегаравий қатламининг экологик ҳолатини башоратлаш ва мониторинг қилиш учун дастурий восита яратиш // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар: Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман материаллари. 27-28 май 2020. - Андижон, 2020. – Б. 62-65.

22. Мурадов Ф.А., Таштемирова Н.Н., Нарзуллаева Н.У. Атмосферада зарарли моддаларнинг тарқалиш жараёнини заррачаларнинг чўкиш тезлигини ҳисобга олган ҳолда сонли моделлаштириш // Илм-фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг инновацион ривожлантиришдаги замонавий муаммолар: Халқаро илмий-амалий конференция материаллари. 13-15 май 2020. – Андижон, 2020. - Б. 263-269.

23. Мурадов Ф.А., Таштемирова Н.Н., Нарзуллаева Н.У. Атмосферада зарарли моддаларнинг тарқалишини физик хусусиятларга мос қисмларга ажратиш усули билан сонли ечиш // Илм-фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг инновацион ривожлантиришдаги замонавий муаммолар: Халқаро илмий-амалий конференция материаллари. 13-15 май 2020. – Андижон, 2020. - Б. 269-275.

24. Мурадов Ф.А. Атмосферада зарранинг чўкиш тезлигини ҳисобга олган ҳолда зарарли моддаларнинг тарқалишини сонли моделлаштириш // Современные проблемы и их решения информационно-коммуникационных технологий и телекоммуникаций. Ч. 3: Тез. докл. Республ. науч.-техн. конф. 30-31 май 2019. – Фергана, 2019. – С. 118-121.

25. Мурадов Ф.А. Атмосферанинг ер усти қатламига заррачаларнинг чўкиш тезлигини ҳисобга олган ҳолда захарли моддаларнинг тарқалишини сонли моделлаштириш // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: Материалы Республиканской научно-технической конференции. 5 сентября 2019. – Самарканд, 2019. – С. 172-178.

26. Мурадов Ф.А., Равшанов З.Н. Моделирование процесса переноса и диффузии мелкодисперсных аэрозолей в атмосфере с учетом скорости

осаждения частиц // Инновационные идеи, разработки и современные проблемы их применения в производстве, а также в обучении. Ч. 2: Материалы Международной научно-практической конференции. 15 апреля 2019. – Андижан: АГУ, 2019. – С. 132-134.

27. Равшанов Н., Мурадов Ф., Ахмедов Д. Численное моделирование процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере в сферической системе координат // Проблемы оптимизации сложных систем: Материалы XIV Международной азиатской школы-семинара. 20-31 июля 2018. В 2-х ч. – Алматы, 2018. – Ч. 2. – С. 142-151.

28. Ravshanov N., Muradov F., Akhmedov D. Air pollution modeling in spherical coordinates // Актуальные проблемы математического моделирования, алгоритмизации и программирования: Материалы Республиканской научно-практической конференции. 17-18 сентября 2018. – Ташкент: Фан ва таълим полиграф, 2018. – С. 210-216.

29. Ravshanov N., Muradov F.A. Models and numerical algorithms of active transport and diffusion of fine particles in the atmosphere // Theoretical & Applied Science. – 2017. – № 4(48). – pp. 189-197.

30. Мурадов Ф.А. Ютилиш коэффициенти аралашмалар миёдориининг қарамлиги. // Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари: Республика илмий-техник анжуман материаллари. – Нукус, 2015. – Б. 392-394.

31. Равшанов Н., Тахиров Ж.О., Мурадов Ф.А. Программа для мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы промышленных регионов // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 04913. 25.12.2017.

32. Равшанов Н., Мурадов Ф.А., Шафиев Т.Р. Программа для ЭВМ «AIR SCREEN» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06395. 15.05.2019.

33. Тахиров Ж.О., Мурадов Ф.А., Набиева С.С. Программа для ЭВМ «AerosolWeb» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06092. 18.02.2019.

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