

**МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ  
ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР  
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

**ҲАМДАМОВ МУЗАФФАР МУХИДДИНОВИЧ**

**РЕАКЦИЯГА КИРИШУВЧИ ГАЗЛАР ТУРБУЛЕНТ СТРУЯЛИ  
ОҶИМЛАРИНИНГ СОНЛИ АЛГОРИТМЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА  
ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси  
Оглавление автореферата диссертации  
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам  
Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD)  
on Physical-mathematical Sciences**

**Ҳамдамов Музаффар Мухиддинович**

Реакцияга киришувчи газлар турбулент струяли оқимларининг сонли  
алгоритмлари ..... 3

**Ҳамдамов Музаффар Мухиддинович**

Численные алгоритмы расчета турбулентных струйных течений  
реагирующих газов ..... 21

**Hamdamov Muzaffar Muhiddinovich**

Numerical algorithms for calculating turbulent jet flows of reacting gases.....39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

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

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ  
ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.Т/ФМ.61.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР  
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

**ҲАМДАМОВ МУЗАФФАР МУХИДДИНОВИЧ**

**РЕАКЦИЯГА КИРИШУВЧИ ГАЗЛАР ТУРБУЛЕНТ СТРУЯЛИ  
ОҚИМЛАРИНИНГ СОНЛИ АЛГОРИТМЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА  
ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.2.PhD/FM356 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси М.Т.Ўразбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар:**

**Хўжаев Исматулла Қўшаевич**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Фатхуллов Алишер Мирзатиллоевич**  
техника фанлари доктори, доцент

**Файзиев Раббим Алиқуллович**  
физика-математика фанлари номзоди, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Самарқанд давлат университети**

Диссертация ҳимояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил “14” “июль” соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент, Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1-мажлислар зали. Тел: (99871) 262-71-52; Факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Диссертация билан Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (8 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йули кўчаси, 33-уй. Тел.: (99871) 262-71-52).

Диссертация автореферати 2021 йил «28» июнь куни тарқатилди.  
(2021 йил «28» июндаги 4 рақамли реестр баённомаси)

**М.М.Мирсаидов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси,  
т.ф.д., профессор, ЎЗР ФА академиги

**М.К.Усаров**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий  
котиби, ф.-м.ф.д., к.и.х.

**З.М.Маликов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д.

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳон миқёсида реакцияга киришувчи муҳитларнинг струяли оқимлари кундалик ҳаётда, иссиқлик ва электр энергияси ишлаб чиқишда, ички ёниш камераларида, кимёвий лазерларда, симоб ва қурилиш материаллари ишлаб чиқаришда, ракета двигателларида, электр станцияларида ва бошқа кўплаб техника ва ишлаб чиқариш тармоқларида кенг қўлланилади. Ташкил этишда қўйилган мақсад ва газ ёқиш қурилмаси конструкциясига қараб объектни бошқаришда турли муаммолар пайдо бўлади. Жумладан, дунёда энергия балансининг тахминан 70 %ини табиий ва суюлтирилган газ ташкил этади. Газ ёқиш қурилмалари кўрсаткичлари доимо яхшиланиб боришига қарамай, уларнинг фойдали иш коэффициентлари ҳали ҳам жуда паст.

Дунёда, қўлланилиш кўлами ва йўналишларининг ортиб бориши туфайли, реакцияга киришувчи тизимларнинг оқимларини ўрганиш кенг кўламда давом этмоқда. Ёқилғининг ёниш жараёнини турлича ташкил этиш ва уни бошқаришда математик моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибаси муҳим аҳамият касб этади. Адекват қурилган математик модель ва сонли алгоритмлар бугунги кунда объектларни билиш ва бошқариш усулларининг ажралмас қисмларидир. Реакцияга киришувчи оқим системаларини математик моделлаштириш турбулентлик ва кимёвий реакцияларнинг янги моделларининг пайдо бўлиши, самарали сонли усуллар, тезкор ва кучли ҳисоблаш техникаси эвазига тез суратларда ривожланмоқда. Бу имкониятлардан фойдаланиш Навье-Стокс тўлиқ тенгламалари системаси ва унинг соддалаштирилган аналоглари ёрдамида мураккаб иссиқлик ва масса алмашинуви масалаларини муваффақиятли ечишда, хусусан струяли оқимларда газ ёниши масалаларини ҳал этишда қўл келмоқда.

Мамлакатимизда иқтисодиёт тармоқларини ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида жумладан: «...иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш»<sup>1</sup> масалалари келтирилган. Атом ва гидравлик электростанциялари, шамол кучи ва қуёш радиациясидан фойдаланиб электр энергияси ишлаб чиқариш учун полигонлар қуриш ва мавжуд электр станцияларини реконструкция қилиш ишлари олиб борилмоқда. Шунингдек, республикаимизда ишлаб чиқарилаётган табиий газнинг 40 %ини истеъмол қилаётган ва ФИК анча паст бўлган маиший ускуналар ва марказлашмаган иссиқлик таъминоти тизимларини такомиллаштириш ҳам муҳимдир. Бу ҳол газ ёқувчи давлатлар учун долзарб ва умумий бўлган муаммодир.

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

Ушбу диссертация иши муайян даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 сонли Фармонида, Ўзбекистон Республикаси Президентининг "Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш соҳасида давлат бошқаруви тизимини такомиллаштириш" тўғрисидаги 2018 йил 3 октябрдаги ПҚ-2789 сонли Қарорида ва ушбу фаолият соҳасида қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни бажаришга муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг IV. "Математика, механика ва информатика" устувор йўналишига мос равишда бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Турбулент струяли оқимларининг қонуниятлари ва асосий тушунчалари Г.Н.Абрамович ва унинг шогирдлари (1936, 1940, 1948, 1960, 1974, 1987 йй), Бай - Ши-и (1960), А.А.Вулис ва шогирдлари (1965, 1968), А.А.Гиневский (1969), А.Ферри, В.Заккей, Л.Алпиниери ва бошқаларнинг илмий ишларида ўрганилган. Ю.В.Лапин ва унинг шогирдлари илмий ишларида реакцияга киришувчи газларнинг турбулент струяли оқимлари тадқиқоти натижалари умумлаштирилган. Кўп сонли струя масалаларининг, жумладан термик ва ўрмон ёнғинларига доир масалаларнинг ечимлари Ю.А.Гостинцев, Н.Н.Семёнов ва уларнинг шогирдлари ишларида қаралган. Реакцияга киришувчи газларнинг турбулент струяли оқимларининг айрим муаммолари Л.Г.Лойцянский, И.С.Макаров, Г.Ф.Кнорре, В.К.Баев, Я.Б.Зельдович, Н.И.Акатнов, Л.Ю.Артюх, Е.С.Шчетинков, А.Ю.Снегирев, А.С.Фролов, S.J.Brookes, A.C. Venim, J. V.Mos, T.P.Coffee, Y.H.Chao, K.S.Hui, P.Cheng, K.Y.Chien, C.R.Gollahalli ва бошқалар томонидан ўрганилган. Р.Б.Ахмедов ва шогирдларининг ишлари ёниш қурилмаларини лойиҳалашга бағишланган.

Струяли оқимлар, турбулентлик ва реакцияга киришувчи газлар назариясига ўзбек олимлари ҳам муносиб ҳисса қўшдилар. Суюқликлар ва кўп фазали муҳитларнинг струяли оқимлари ривожланиши А.А.Ҳамидовнинг илмий ишлари билан боғлиқ, Ф.А.Алиев, З.Ш.Жумаев, И.К.Хўжаев ва уларнинг шогирдлари илмий ишларида реакцияга киришувчи газларнинг турбулент оқимларини ҳисоблаш усуллари келтирилган, Қ.Ш.Латипов, Ю.М.Денисов, И.Н.Хусанов, А.М.Арифжонов, А.М.Фатхуллаев, З.М.Маликов ва бошқаларнинг илмий ишларида турбулентликнинг турли моделлари таклиф этилган. Бу соҳаларда кўплаб ишлар қилинишига қарамай, струяли оқимларда ёниш жараёнларини бошқариш масалалари кам ўрганилган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқотлари Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги

институтида бажарилган БВ-М-Ф4-001 "Гидродинамика ва машинасозлик муаммоларини математик моделлаштириш асосида тадқиқ этиш ва ечишнинг янги усулларини ишлаб чиқиш" грант доирасида амалга оширилди.

**Тадқиқотнинг мақсади** газларнинг турбулент струяли оқимлари масалаларини ҳал қилиш учун сонли усуллар ишлаб чиқиш ва уларни кимёвий ўзгаришлар шароитида иссиқлик ва масса алмашиниш жараёнларини ўрганишда қўллашдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

адабиётлар таҳлили асосида газларнинг кимёвий реакцияси ва турбулентлик моделларини ўрганиб чиқиш;

диффузион ёниш муаммосини шакллантириш, уни ечиш учун сонли усуллар ва дастурий таъминотни ишлаб чиқиш;

ўққа нисбатан симметрик йўлдош оқимда чекли тезликда ёниш масаласи учун дастурий таъминот ишлаб чиқиш ва сонли натижалар олиш;

ёқилғи сопловининг радиусига, газ-ҳаво аралашмасининг таркибига ва бошқа омилларга боғлиқ равишда струя ва аланга хусусиятларини ўрганиш.

**Тадқиқот объекти** йўлдош турбулент ҳаво оқимида газни ёқиш жараёнлари ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг предмети**ни ёниш жараёнига ўққа нисбатан симметрик турбулент струянинг газодинамик кўрсаткичлари ташкил этишди.

**Тадқиқот усуллари.** Тадқиқот жараёнида струяли оқимларни математик моделлаштириш, чекли айирмалар, ҳисоблаш тажрибалари ва натижаларни визуаллаштириш усулларидан фойдаланилди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

Икки хил таркибли газларнинг алоҳида киритилиши ҳолида масалаларни ечишда қўлланадиган Шваб-Зельдович функцияси усули диффузион ёниш, компоненталар орасидаги кимёвий мувозанат ва кимёвий реакциянинг чекли тезлиги моделлари учун умумлаштирилди;

кўп компонентали реакцияга киришувчи газлар турбулент чегаравий катламининг чизиқли бўлмаган тенгламалари сони Шваб-Зельдович функциялари ва Мизес ўзгарувчилари киритиш орқали камайтирилди;

кўп компонентали газларнинг ўққа нисбатан симметрик чегаравий турбулент катлами тенгламаларини чекли ва чексиз тезликларда диффузион ёниш масалаларини ечиш учун сонли усуллар ишлаб чиқилди;

оқим функцияси майдонида олинган натижаларни цилиндрик координаталарда ўзгармас кадам билан ифодалаш усули ишлаб чиқилди;

сонли тажриба йўли билан ёқилғи сопловининг радиуси ва газ-ҳаво аралашмасидаги ёқилғи концентрациясининг камайиши, шунингдек чексиз йўлдош ҳаво оқими ҳароратининг ошиши аланга максимал ҳароратининг камайишига ва ташландиқ газ таркибидаги ёнмай қолган ёқилғи ҳажми ошишига олиб келиши исботланди.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** ёқилғи соплови ўлчами, алоҳида киритилаётган газлар ҳарорати ва газ-ҳаво аралашмасининг таркибини ўзгартириш орқали аланга кўрсаткичларини бошқаришга доир ҳисоблаш тажрибаси услубиятининг яратилгани билан ифодаланади.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** кимёвий реакция ва турбулентликнинг синалган моделларидан фойдаланилганлиги, қўлланилган сонли усулларда тенгламалар ва чегаравий шартлар аппроксимациясида зарурий аниқлик таъминланганлиги ва айрим натижаларнинг мавжуд тажриба маълумотлари билан солиштирилганлиги орқали таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти струяли оқимда пропан-бутан аралашмасининг чексиз тезликда ва метаннинг чекли тезликда ёниши масалаларини Мизес координаталарида ечишнинг сонли усуллар ва ҳисоблаш алгоритмларининг ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти струяли оқимлар масалаларини ечиш учун самарали сонли усуллар яратилгани, Мизес координаталаридан цилиндрик координаталарга ўтиш алгоритми ишлаб чиқилганлиги ва метан-ҳаво аралашмасининг диффузион ёниши учун факторли таҳлил ўтказилганлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Тадқиқот жараёнида реакцияга киришувчи газларнинг турбулент струяли оқимларини ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурий воситалар:

«ЁФА-Фтех-2018-13» фундаментал грантини бажариш жараёнида қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2021 йил 12 апрелдаги № 2/1255-1011-сонли маълумотномаси). Мизес ўзгарувчилари ва Шваб-Зельдович функцияларини қўллаш натижасида ечиладиган чизиқли бўлмаган дифференциал тенгламалар сони икки мартадан ортиққа қисқартирилди ва аэродинамиканинг мураккаб тенгламалари интегро-дифференциал тенгламаларга олиб келинди.

"Когон иситгич мосламалар" хусусий корхонасида ёқилғини тежовчи қурилмаси ишлаб чиқишда қўлланилган ("Ўзбекистон Миллий Электр тармоқлари" АЖнинг 2021-йил 28-апрелдаги 01-04-28/1483-сон маълумотномаси). Метанга ҳаво қўшиш усулини қўллаш натижасида ёқилғи газнинг 2-5% тежалишига ва назарий жиҳатдан аниқланган соплонинг самарали радиусидан фойдаланиш натижасида 5% ёқилғи газ тежалишига эришилди.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Тадқиқот мавзуси бўйича 17 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та илмий мақола, шу жумладан, 2 таси республика ва 6 таси хорижий журналларда (3 таси Scopus маълумотлар базасига кирувчи нашрларда) чоп этилган. ЭҶМ учун дастурий маҳсулот қайд этилганлиги ҳақида 3 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация таркиби кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 119 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фани ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган ҳамда тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, ишнинг янгиликлари, назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлик ҳолати ҳамда нашр этилган ишлар ва диссертация ишининг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг "Кимёвий реакцияли оқимларнинг тадқиқотига доир илмий манбалар таҳлили" деб номланган биринчи боби уч параграфдан иборат.

Бобнинг биринчи параграфда газларнинг струяли оқимлари Г.Н.Абрамович, Бай Ши-И, А.А.Вулис, В.П.Кашкаров, Ю.В.Лапин, Ф.А.Алиев, З.Ш.Жумаев, А.С.Фролов, S.J.Brookes, А.С.Benim, J.B.Mos, T.P.Coffee, Y.H.Chao, K.S.Hui, P.Cheng, K.Y.Chien, S.R.Gollahalli ва бошқа кўплаб мутахассисларнинг маълумотлари асосида муҳокама қилинган. Струя оқимларни моделлаштиришда чегаравий қатлам ёндашувидан фойдаланилади. Тезлик, импульс, зичлик, моддалар концентрациялари ва ҳароратининг киришдаги тангенциал узилиши турбулент оқим режимининг ҳосил бўлишига олиб келади. Ясси параллел ва ўққа нисбатан симметрик масалаларда яқка ва йўлдош оқимлар фарқланишади. Ёниш бўлмаган ҳолларда кўп сонли масалалар учун субстанцияларнинг тақсимотига доир формулалар олинган. Бунда асосий эътибор бугунги кунга қадар ривожланишда давом этаётган турбулентлик назариясига қаратилиши лозим.

Иккинчи параграфда газ оқимларида ёниш реакциясининг математик моделлари ривожланиши баён этилган. Ёнишнинг асосий моделлари: Бунзен горелкаси, чекли ва чексиз тезликда диффузион ёниш, кимёвий мувозанат моделлари келтирилган. Брутто-реакция ва радикалларнинг шаклланиши билан кечадиган кўп босқичли реакциялар доирасида ёниш кинетикаси муҳокама этилган. Чекли тезликдаги реакциялар учун Аррениус қонуни ва кимёвий мувозанат тенгламаси тушинтирилган.

Кимёвий трансформациялар билан кечадиган оқимларни математик моделлаштиришнинг асосий муаммоларидан бири  $N$  та компоненталарнинг сақланиши ва кўчиши тенгламалари ҳисобланади. Биринчи бобнинг учинчи параграфда Шваб-Зельдович функциялари ва нисбий-ошиғич концентрацияларни киритиш усули тақдим этилган. Реакция тезлигининг чексиз катта қиймати ҳолида улар  $N$  тенгламаларни битта эквивалент тенгламага алмаштириш имконини беришади. Ишда Аррениус қонуни ва кимёвий мувозанат ҳолатлари учун Шваб-Зельдович функцияларидан

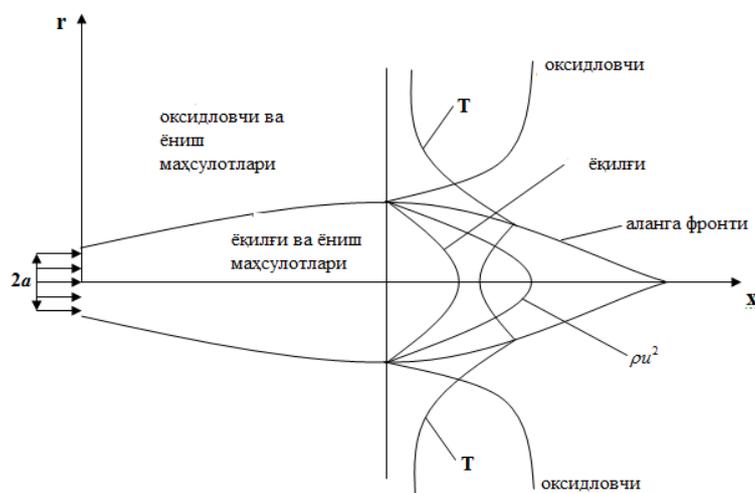
фойдаланиш вариантлари келтирилган. Биринчи ҳолда иккита дифференциал тенглама ечилади, иккинчи ҳолда эса концентрацияларга нисбатан битта дифференциал тенглама ва битта трансцендент тенглама ечилади.

Муаммонинг ўрганилганлик ҳолати таҳлили ва газ ёниши соҳасидаги долзарб муаммолардан келиб чиққан ҳолда тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

Диссертациянинг иккинчи боби "Ўққа нисбатан симметрик турбулент струяда пропан-бутан аралашмасининг диффузион ёниши ҳисобининг сонли усули" деб номланган. Унинг биринчи параграфида масаланинг физик ва математик қўйилиши берилган.

Струяли ёнувчи газ диаметри  $2a$  га тенг бўлган кувурдан  $u_2$  тезлик билан оқиб чиқаяпти ва тезлиги  $u_1$  бўлган йўлдош оқимда тарқалаёпти.

Объектнинг схематик кўриниши 1-расмда берилган.



1-расм. Струяли аланганинг схематик кўриниши

Алоҳида киритилаётган газ аралашмаларининг ҳар бири ўз таркибига ва теплофизик хусусиятларига эга. Ёқилғи газ ҳаво таркибидаги кислород билан реакцияга киришади. Ёниш тезлиги жуда катта деб ҳисобланади, шу туфайли ёқилғи соҳасига кислород крмайди ва ҳаво таркибидаги кислород ёнувчи аралашманинг соҳасига ўта олмайди.

Кимёвий жихатдан пассив газлар конвектив кўчади ва бошқа компоненталар билан диффузияга киришади.

Ёниш жараёни кайтаримсиз брутто-реакциянинг стехиометрик тенгламаси шаклида моделлаштирилди:



Масаланинг математик моделини шакллантиришда турбулент ёпишқоқликнинг кинематик коэффициенти Л.Прандтлнинг янги гипотезасини қўллаш асосида топилди ( $m^2 c^{-1}$ ):

$$v_t = \chi b(x) |u_{\max} - u_{\min}|_x, \quad (1)$$

бу ерда  $b(x)$  – струянинг  $x$  кесимдаги, ўқдан бошлаб ҳисобланган кенглиги;  $u_{\max}, u_{\min}$  – тезлик векторининг бўйлама компонентасининг  $x$  кесимдаги энг катта ва энг кичик қийматлари.

Ўзаро аралашаётган оқимларнинг киришдаги умумий чегараларида кўрсаткичларнинг тангенциал узилиши ва иссиқлик, масса кўчиши соҳасида юқори ҳароратли аланга фронти мавжудлиги ушбу соҳада оқимнинг турбулентлигидан далолат беради. Газлар ҳаракатида оқимнинг асосий йўналиши мавжудлиги туфайли жараёни тавсифлаш учун турбулент чегаравий қатламнинг тенгламаларидан ( $Le_i=1$  шarti билан) фойдаланиш мумкин:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial u}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \vartheta r)}{\partial r} = 0, \\ \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{Pr r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial}{\partial r} \left( H - (1 - Pr) \frac{u^2}{2} \right) \right), \\ \rho u \frac{\partial c_k}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial c_k}{\partial r} = \frac{1}{Sc r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial c_k}{\partial r} \right) + \omega_k \quad (k=1..N); \end{array} \right. \quad (2)$$

Бу ерда  $u, v$  – тезликнинг бўйлама ва радиал ўқлар бўйича ташкил этувчилари ( $m \text{ c}^{-1}$ );  $x, r$  – бўйлама ва радиал координаталар ( $m$ );  $\rho, T$  – газ зичлиги ( $kg \text{ m}^{-3}$ ) ва абсолют ҳарорати ( $K$ );  $p$  – босим ( $Pa$ );  $Pr, Sc$  – Прандтль ва Шмидт турбулентлик сонлари;  $c_k$  –  $k$ -компонентанинг масса концентрацияси ( $kg \text{ kg}^{-1}$ );  $\omega_k$  – ёнишнинг масса бўйича тезлиги ( $kg \text{ m}^{-3} \text{ c}^{-1}$ ).

Газ аралашмаси мукамал деб фараз қилинади, шунинг учун Менделеев-Клапейрон унинг ҳолати тенгламасини қаноатлантиради

$$p = \rho R_0 T / m, \quad (3)$$

бу ерда  $m = \left( \sum_{k=1}^N c_k / m_k \right)^{-1}$  ва  $m_k$  – газ аралашмаси ва  $k$ -газ компонентаси моляр массалари ( $kg \text{ моль}^{-1}$ );  $R_0$  – универсал газ доимийси  $8.341 \text{ Ж моль}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Газ аралашмасининг тўла энтальпияси ( $Ж \text{ kg}^{-1}$ )ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$H = c_p T + \frac{U^2}{2} + \sum_{k=1}^N c_k h_k^*, \quad (4)$$

бу ерда  $c_p = \sum_{k=1}^N c_{pk} c_k$  ва  $c_{pk}$  – газ аралашмаси ва  $k$  – компонентанинг ўзгармас босим ҳолидаги солиштирма иссиқлик сиғими ( $J \text{ кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $U^2/2 \approx u^2/2$  – чегаравий қатлам назарияси яқинлашувида бирлик масса газ аралашмасининг кинетик энергияси;  $h_k^*$  – экзотермик реакцияда  $k$  -компонентадан ажралиб чиқаётган иссиқлик миқдори ( $J \text{ кг}^{-1}$ ).

Струя соҳасига  $x=0$  киришдаги чегаравий шартлар куйидагича шакллантирилди:

$$0 \leq r \leq a: u(0,r) = u_2, \quad T(0,r) = T_2, \quad c_k(0,r) = (c_k)_2;$$

$$a < r \leq r_\infty: u(0,r) = u_1, \quad T(0,r) = T_1, \quad c_k(0,r) = (c_k)_1.$$

$x > 0$  да струя ўқида симметрия шартлари:

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(x,0)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial c_k(x,0)}{\partial r} = 0, \quad v(x,0) = 0,$$

струя чегараси  $r=b(x)$  да эса йўлдош оқимнинг кўрсаткичлари кабул қилинди:

$$u(x,r) = u_1, \quad T(x,r) = T_1, \quad c_k(x,r) = (c_k)_1.$$

Тўлиқ энтальпиянинг чегаравий шартлари (4) формула бўйича аниқланди.

Иккинчи параграфда диффузион ёниш учун компоненталарнинг сақланиш тенгламаларини ягона тенгламага олиб келиш усули ёритилган.

Ёқилғи аралашмада пропан ва бутан концентрациялари тенг миқдорда олинган, деб ҳисоблаймиз. Бундай ҳолда жараённинг стехиометрик тенгламасини куйидагича ёзиш мумкин:



бу ерда стехиометрик коэффициентлар  $\nu_1 = 5.75$ ,  $\nu_2 = 1$ ,  $\nu_3 = 3.5$ ,  $\nu_4 = 4.0$  моль кислород, ёқилғи газ, углерод оксиди ва сув буғи учун олинган,  $h_2^* = 45000 \text{ кЖ/кг}$ . Бундан ташқари бешинчи компонента – молекуляр азот  $N_2$  ҳам мавжуд ва у кимёвий пассив компонента ҳисобланади.

Компоненталар сақланиш тенгламаларини қисқача кўринишда ёзиш мумкин:

$$L(c_k) = \omega_k \quad (k=1..5), \quad (5)$$

бу ерда  $L(c_k) = \rho u \frac{\partial c_k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_k}{\partial r} - \frac{1}{Sc r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_i r \frac{\partial c_k}{\partial r} \right)$  – ўз аргументи –  $k$  -

компонентанинг масса концентрацияси  $c_k$  га нисбатан чизиқли ва бир жинсли оператор.

Кимёвий реакция тезликлари учун куйидаги муносабатлар ўринли:

$$\begin{aligned} \omega_3 \nu_k m_k + \omega_k \nu_3 m_3 &= 0 \quad \text{при } k=1,2; \\ \omega_3 \nu_k m_k - \omega_k \nu_3 m_3 &= 0 \quad \text{при } k=4; \end{aligned} \quad (6)$$

бу ерда  $\omega_1, \omega_2 \leq 0$ ,  $\omega_3, \omega_4 \geq 0$ .

(6) формула асосида Шваб-Зельдович функциялари

$$\tilde{c}_k = \begin{cases} c_3 \nu_k m_k + c_k \nu_3 m_3 = 0 & \text{при } k = 1, 2; \\ c_3 \nu_k m_k - c_k \nu_3 m_3 = 0 & \text{при } k = 4, \end{cases} \quad (7)$$

киритилса, компоненталар сақланиши (5) тенгламалари  $k = 1, 2, 4$  лар учун қуйидагича шаклга келади:

$$L(\tilde{c}_k) = 0. \quad (8)$$

$\omega_5 = 0$  бўлганлиги туфайли инерт газ концентрацияси тенгламаси ҳам  $L(c_5) = 0$  шаклга келади. Яъни, беш компонента концентрациялари учун тўртта дифференциал тенгламадан фойдаландик. Етишмаётган тенглама диффузион ёниш модели гипотезаси билан алмаштирилади.

Жорий  $\tilde{c}_k$  функциянинг чегаравий шартлари шакллантирилди ва  $k = 1, 2, 4$  ва 5 учун нисбий-ошиғич функция киритилди:

$$\tilde{C} = \frac{\tilde{c}_k - (\tilde{c}_k)_1}{(\tilde{c}_k)_2 - (\tilde{c}_k)_1} = \frac{c_5 - (c_5)_1}{(c_5)_2 - (c_5)_1}. \quad (9)$$

$k = 1, 2, 4$  ва 5 компоненталар учун (5) тенгламага эквивалент тенглама  $L(\tilde{C}) = 0$  эканлиги исботланди ва аланга фронтининг ўрнини аниқлаш учун

$\tilde{C}^* = \left[ 1 + \frac{(c_2)_2 \nu_1 m_1}{(c_1)_1 \nu_2 m_2} \right]^{-1}$  формула олинди. Модель гипотезасига кўра, ёқилги соҳасида оксидловчи бўлмаслиги ва оксидловчи соҳасида ёқилги газ бўлмаслигини ҳисобга олиб, компоненталарнинг концентрацияларини топиш учун формулалар келтириб чиқарилди.

Учинчи параграфда характерли  $a, u_2, H_2, \rho_2$  қийматлар ёрдамида ўлчовсиз катталикларга ўтилди:  $\bar{x} = \frac{x}{a}, \bar{y} = \frac{y}{a}, \bar{u} = \frac{u}{u_2}, \bar{v} = \frac{v}{u_2}, \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{au_2}, \bar{H} = \frac{H}{H_2}, \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_2}, \bar{T} = \frac{T}{T_2}, \bar{p} = \frac{p}{\rho_2 u_2^2}, \bar{h}_2^* = \frac{h_2^*}{H_2}$  ва Мизес ўзгарувчилари киритилди.

Бу ҳолда тенгламалар қуйидаги кўринишда ёзилди (ўлчовсизлик белгиси катталиклар устидаги чизиқлар ташлаб юборилди):

$$\begin{cases} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial u}{\partial r} \right), & \frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \vartheta r)}{\partial r} = 0, \\ \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{Pr r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial}{\partial r} \left( H - (1 - Pr) \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 u^2 \right) \right) \\ \rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial \tilde{C}}{\partial r} = \frac{1}{Sc r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_t r \frac{\partial \tilde{C}}{\partial r} \right). \end{cases}$$

Газ аралашмасининг ҳолат тенгламаси қуйидагича бўлди:  $\bar{\rho} = \frac{m}{(m)_2 \bar{T}}$ .

Мизес алмаштиришлари оқим функцияси  $\psi$  орқали киритилди:

$$\rho u r = \psi \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \rho \vartheta r = -\psi \frac{\partial \psi}{\partial r}.$$

Ҳисоблаш учун зарур бўлган кўндаланг координатанинг киймати  $\frac{r^2}{2} = \int_0^\psi \frac{\psi d\psi}{\rho u}$  формуладан топилади.  $(x, r)$  координаталардан  $(\xi, \psi)$

координаталарга ўтишда қуйидаги формулалардан фойдаланилди:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{r}{\psi} \rho \vartheta \frac{\partial}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial}{\partial r} = \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial \psi} = \frac{r}{\psi} \rho u \frac{\partial}{\partial \psi}.$$

Саккиз тенгламали система ўрнига қуйидаги система қурилди:

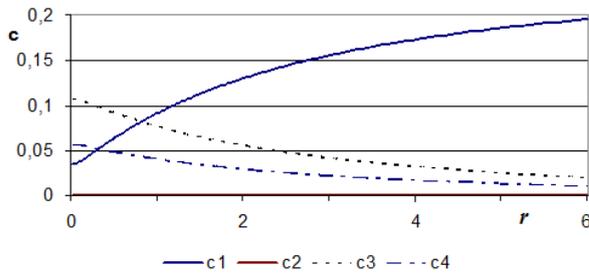
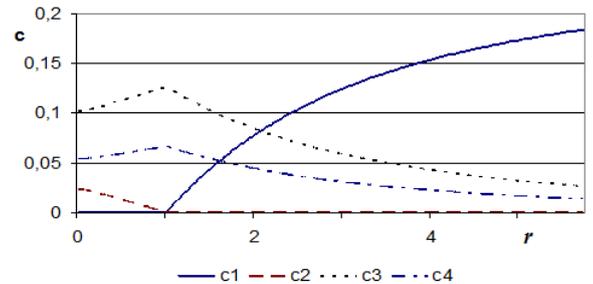
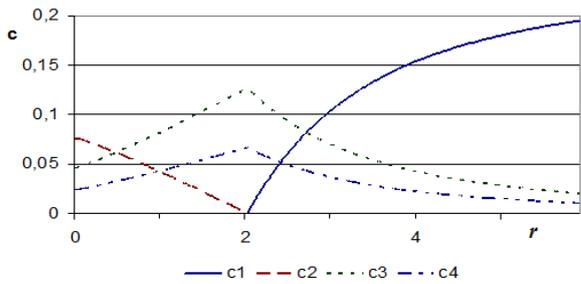
$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_r u}{\psi} \left( 2 \int_0^\psi \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) \frac{\partial u}{\partial \psi} \right], \\ \frac{\partial H}{\partial \xi} = \frac{1}{\text{Pr} \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_r u}{\psi} \left( 2 \int_0^\psi \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H - f u^2) \right], \\ \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \xi} = \frac{1}{\text{Sc} \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_r u}{\psi} \left( 2 \int_0^\psi \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \psi} \right]. \end{cases}$$

Бу ерда  $f = (1 - \text{Pr}) \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2$ .

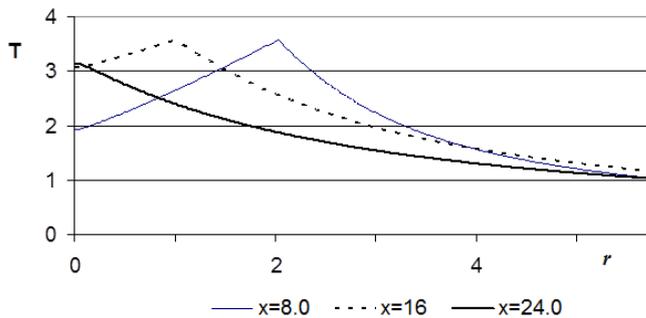
Тўртинчи параграфда масалани ечишнинг сонли усули ва алгоритми келтирилган. Масалани Мизес координаталарида ечиш учун бўйлама координата бўйлаб биринчи тартибли ва кўндаланг координата бўйлаб иккинчи тартибли аниқликни таъминловчи икки қатламли, тўрт нуқтали ошқормас чекли-айирмали схемадан фойдаланилди. Субстанциялар сақланиши ва кўчиши тенгламалари чизикли бўлмаганлиги ва струянинг чегараси ва аланга шакли номаълум бўлганлиги туфайли итерация жараёни ташкил этилди. Сонли интеграллаш қадамлари ҳисоблаш жараёнининг яқинлашувчанлигини таъминлайдиган даражада танланди.

Бешинчи параграфда диффузион ёниш бўйича сонли тажриба натижалари ва уларнинг таҳлили келтирилган. Ҳавонинг масса таркиби қуйидаги кўринишда олинди:  $(c_1)_1 = 0.232$ ,  $(c_5)_1 = 0.768$ . Ёқилғи аралашмаси пропан-бутан аралашмаси ва азотни ўз ичига олди. Асосий оқим тезлиги 60 м/с ( $M_2 \approx 0$ ), йўлдош оқимники – 18.3 м/с. Ҳаво ҳарорати –  $T_1 = 297 \text{ K}$ , ёқилғи аралашмасиники –  $T_2 = 600 \text{ K}$ , ёқилғи сопловининг радиуси – 0.001 м.

2-расмда турли кесимлар учун  $(c_2)_2 = 0.120$  бўлган ҳолда олинган реагентлар ва ёниш маҳсулотларининг концентрациялари келтирилган. Бу ҳолда аланга жойлашиш ўрни  $\tilde{C} = \tilde{C}^*$  ( $= 0.349348$ ) тенгликдан аниқланди. Аланга фронтида ҳарорат 2144.93 K га тенг.



**2-расм. Реагентлар ва ёниш маҳсулотлари масса концентрациялар эгри чизиқлари  $\bar{x} = 8.0, 16.0$  и  $24.0$ .  $(c_2)_2 = 0.120$**



**3- расм.  $\bar{x} = 8.0, 16.0$  ва  $24.0$ , кесимлардаги ўлчамсиз ҳароратнинг ўзгариши.  $(c_2)_2 = 0.120$  да олинган**

Олтинчи параграфда  $k - \varepsilon$  турбулентлик модели

$$\begin{cases} \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{1}{\delta_k r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho r v_t \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \varepsilon, \\ \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{1}{\delta_\varepsilon r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho r v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \dot{c}_1 \frac{\varepsilon}{k} G - \dot{c}_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{cases} \quad (12)$$

ёрдамида ўққа нисбатан симметрик струяда метаннинг диффузион ёнишига доир сонли натижалар келтирилган.

Бу ерда  $v_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon}$ ,  $G = 4\rho v_t \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2$ ,  $\dot{c}_1 = 1.44$ ,  $\dot{c}_2 = 1.92$ ,  $c_\mu = 0.09$ ,  $\delta_k = 1$ ,

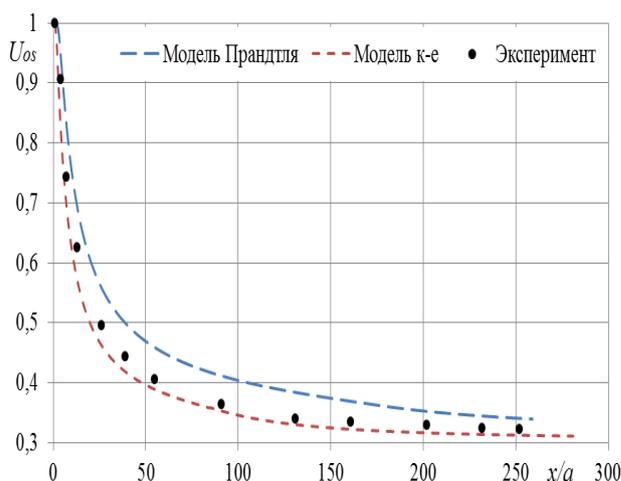
$\delta_\varepsilon = 1.3$ ,  $k$  – бирлик массали газ пульсацион ҳаракатининг кинетик энергияси;  $\varepsilon$  – турбулентлик энергиясининг диссипация тезлиги. Киришдаги маълумотлар қуйидагича олинди:  $k = 0.007u^2$ ,  $\varepsilon = \frac{0.001k^2}{0.3}$ ,  $v_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon}$ .

Компоненталарнинг моляр массалари  $m_1 = 32.000$ ,  $m_2 = 16.043$ ,  $m_3 = 44.011$ ,  $m_4 = 18.020$ ,  $m_5 = 28.016$  г/моль га тенг, брутто-реакция

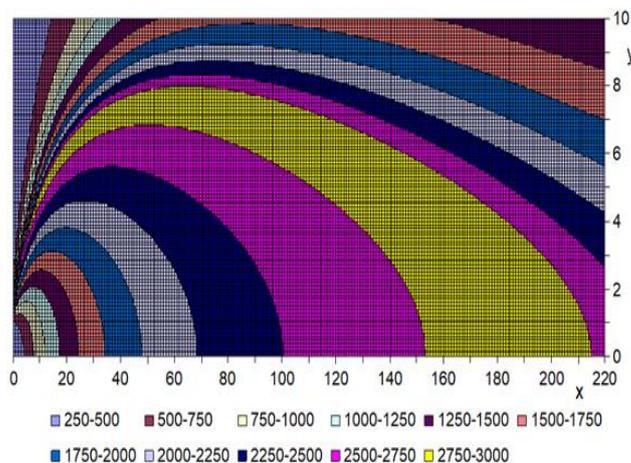


учун стехиометрик коэффициентлар қийматлари  $\nu_1 = 2$ ,  $\nu_2 = 1$ ,  $\nu_3 = 1$ ,  $\nu_4 = 2$ ,  $\nu_5 = 0$  моль. Ёнувчи газ таркибига метан ва азот кирган. Объектнинг қолган кўрсаткичлари олдинги параграфдаги каби қабул қилинди. 4-расмда ўқдаги

оқим тезлигининг ўзгариши турбулентликнинг икки модели ва тажриба натижалари билан таққосланган.



**4-расм.** Ўлчовсиз бўйлама тезликнинг ўқдаги қийматининг ўзгариши  
 $T_1 = 297\text{ K}, T_2 = 600\text{ K}, u_2 = 61\text{ м/с}$



**5-расм.**  $T_1 = 600\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$  бўлган ҳолда метан диффузион ёнишида изотермалар майдони

Ҳисоб-китоблар кўрсатишича, ёкилғи газнинг ҳарорати ортиши билан аланганинг узунлиги камаяди ва ҳарорати ортади; ҳаво ҳароратининг ошиши аланганинг узайишига олиб келади. Хусусий ҳолда,  $T_1 = 600\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$  да максимал ҳарорат  $T^* = 3078.43\text{ K}$  га, аланга узунлиги  $224.9a$  га тенг (5-расм).  $T_1 = 400\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$  ҳолида  $T^* = 2910.44\text{ K}$  ва  $203.7a$  олинди.

Диссертациянинг учинчи боби "Метаннинг ўққа нисбатан симметрик йўлдош турбулент струяда тарқалиши ва чекли тезликда ёнишини ҳисоблашнинг сонли усули" тўрт параграфдан иборат.

Бобнинг биринчи параграфида  $k-\varepsilon$  турбулентлик модели ёрдамида ўққа нисбатан симметрик струяда метаннинг чекли тезликдаги реакцияси масаласининг математик модели тавсифланган. Метан-ҳаво аралашмаси диаметри  $2a$  бўлган доиравий соплодан чиқади ва кимёвий реакциянинг чекли тезлигида йўлдош ҳаво оқимида тарқалади.

Объектни моделлаштириш учун (2), (12) тенгламалардан, мос тўлдирувчи муносабатлар ва чегаравий шартлардан фойдаланилди.

Бобнинг иккинчи параграфида кимёвий реакциянинг чекли тезлиги учун Шваба-Зельдович нисбий-ошиғич функциясини киритиш усули келтирилган. [Фролов ва шогирдлари ] га кўра, метаннинг кислород билан реакцияси тезлиги қуйидагича олинди:

$$\omega_2 = -An_1^2 n_2 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \text{ бу ерда } A = 1.35 \cdot 10^{20},$$

$E_a = 3.00 \cdot 10^4$ ,  $n_1, n_2$  – оксидловчи ва ёнилғи газларнинг ҳажмий концентрациялари. Умумлашган Шваб-Зельдович функциясини киритиб, компоненталар сақланишининг беш тенгламалари (5) системаси иккита тенгламага олиб келинди. Ёниш тезлиги товуш тезлигидан анча паст бўлган оқим соҳасида амалга оширилади. Шунинг учун тўлиқ энтальпияни

ифодалашда газнинг кинетик энергияси инобатга олинмайди. У ҳолда концентрациялар тенгламалари учун киритилган алмаштиришни тўлиқ энтальпия учун ҳам фойдаланиш мумкин ва бу қадам умумий энтальпияни нормалаштиришга олиб келади:

$$\tilde{H} = \frac{H - H_1}{H_2 - H_1} = \tilde{C}.$$

$$\text{Бу ерда } H_1 = (c_p)_1 T_1 + (c_2)_1 h_2^*, \quad H_2 = (c_p)_2 T_2 + (c_2)_2 h_2^*.$$

Бу ҳолда газ аралашмасининг температура ва зичлик қийматлари қуйидаги формулалар ёрдамида ҳисобланади:

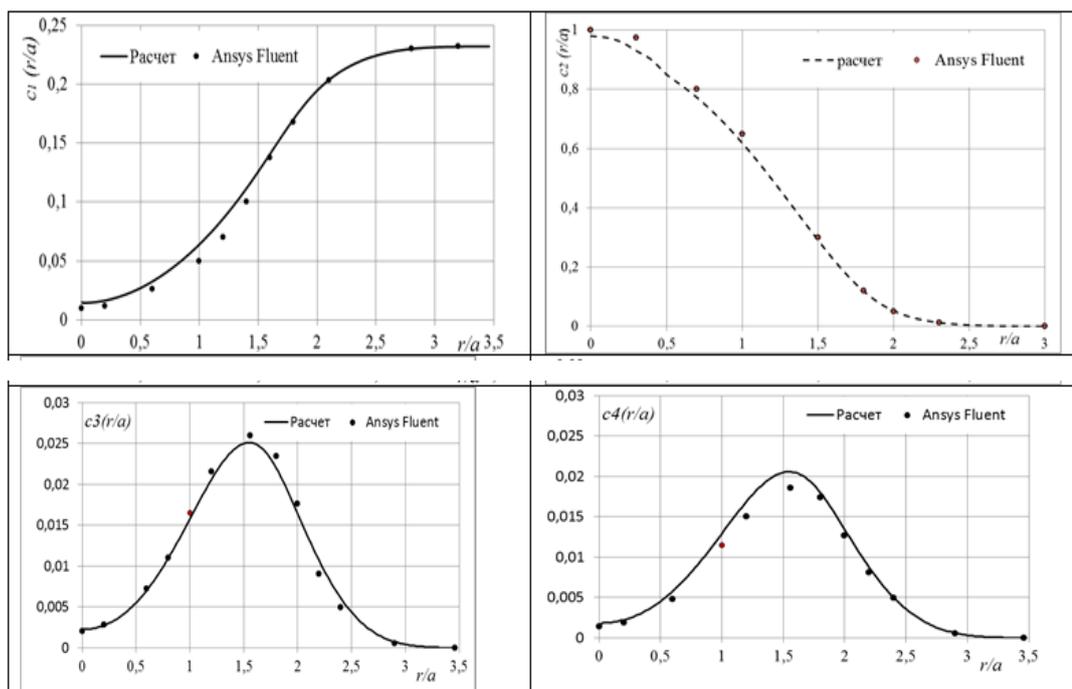
$$T = (H - c_2 h_2^*) / c_p = \left[ H_1 + (H_2 - H_1) \tilde{H} - c_2 h_2^* \right] / \sum_{n=1}^N c_{pn} c_n, \quad \rho = \frac{P}{R_0 T \sum_{n=1}^N c_n / m_n}.$$

Учинчи параграфда Мизеснинг ўлчовсиз ўзгарувчиларига ўтилди, тенгламалар ва шартларни дискретлаш амалга оширилди. Умумлашган Шваб-Зельдович функциясини ва Мизес ўзгарувчиларини киритиш натижасида ўнта дифференциал тенгламалар уларга эквивалент бўлган бешта тенглама билан алмаштирилди.

Тўртинчи параграфда алоҳида масаланинг ҳисоблаш натижалари келтирилган. Соф метан ёқилғи сифатида қабул қилинган. Асосий оқим тезлиги 61 м/с, ҳаво оқими – 18.3 м/с га тенг. Ҳаво ва ёқилғи аралашмаси ҳарорати –  $T_1 = T_2 = 293.15 \text{ K}$ , соплó радиуси  $a = 0.01 \text{ м}$ .

Ҳар бир ҳисоблаш Ansys Fluent 6.3 дастурий муҳитида такрорланди ва икки натижалар солиштирилди.

Компоненталар масса концентрацияларининг типик тақсимотлари олинади. 6-расмда  $x/a = 5$  да уларнинг таққосланиши кўрсатилди.

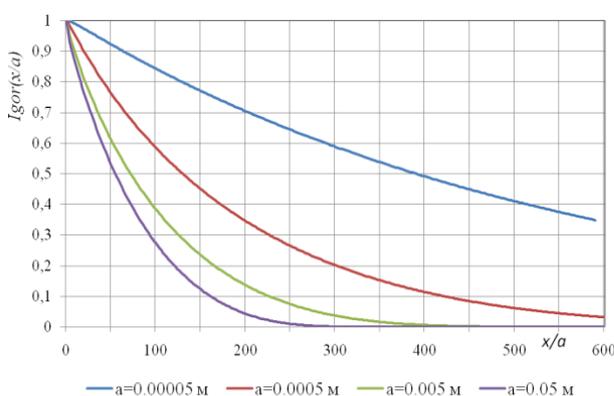


6-расм. Компоненталар масса концентрацияларининг  $x/a = 5$  даги графикалари

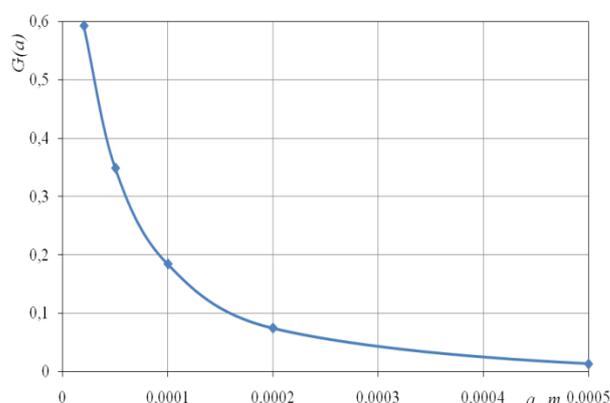
Тўртинчи боб "Метаннинг ёниш билан кечадиган струяли оқимида иссиқлик ва масса узатиш жараёнларига алоҳида омиллар таъсирини ўрганиш бўйича ҳисоблаш тажрибаси" уч параграфдан иборат. Метан якка струясининг йўлдош ҳаво оқимидаги хусусиятларини тизимли ўрганиш мақсадида ушбу бобда кенг кўламли ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди. Компиляция қилинган дастурий воситадан ёқилғи диаметри, метан-ҳаво аралашмасининг бошланғич концентрацияси, ҳамда ҳаво ҳароратининг струя ва аланга параметрларига таъсирини ўрганиш учун фойдаланилди.

Биринчи параграфда ёнувчи газ сапоси диаметрининг струя параметрларига таъсири тадқиқ қилинди. Тўлиқ энтальпия, бўйлама тезлик, компоненталарнинг концентрациялари ва изотерма майдонлари сопло радиуси  $a$  нинг 0.05, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001, 0.0005, 0.0002, 0.0001, 0.00005, 0.00002 м қийматлари учун олинди. Айна вақтда алоҳида киритилаётган ҳаво ва ёқилғи газ (метан)нинг тезлиги, таркиби ва ҳарорати III бобдагидек сақланиб қолинди.

7-расмда соплови радиусининг турли қийматларида струянинг муайян кесимида ёнмаган ёқилғи қисмини кўрсатувчи ёниш эгри чизиқлари келтирилган. Улар катта радиусларда ёқилғининг тўлиқроқ ёнишини кўрсатишди. Ҳисобларда аланганинг охири  $\tilde{N}_{осв} = 0.02$  шартдан аниқланди ва унга мос ёқилғи газнинг ёнмасдан қолган қисмининг сопло радиусига боғлиқлиги 8-расмда келтирилмоқда.



**7-расм. Соплонинг турли радиусларида ёқилғининг ёниш эгри чизиқлари**



**8-расм. Аланга охирида ёқилғи газнинг ёнмасдан қолган қисмининг сопло радиусига боғлиқлиги**

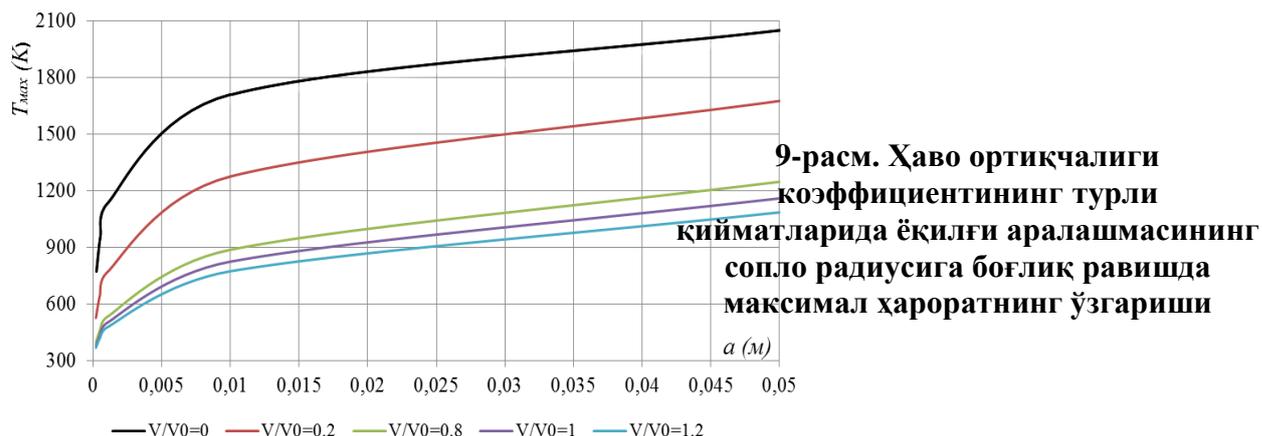
Бобнинг иккинчи параграфда киришдаги ҳаво ҳароратининг аланга ва струя параметрларига таъсири ўрганилди. Аланганинг аниқланган хусусиятлари асосан икки омил билан изоҳланди. Ҳаво ҳароратининг ошиши билан ёниш соҳасига киритилаётган газ сийраклашиб боради ва ҳавонинг зичлиги ва унга мос равишда реакцияга киришувчи кислороднинг ҳажми ҳам камаёди. Шу туфайли аланга узаяди ва ташландиқ газда ёқилғининг улуши ортади.

Учинчи параграфда ёнувчи газ сифатида метан-ҳаво аралашмаси қаралган. Ёқилғи учун ҳавонинг ортиқчалиги коэффициентининг аналогиси  $\alpha = V / V_0$ : ёқилғи билан киритилган ҳаво миқдори  $V$  нинг назарий жиҳатдан

тўлиқ ёниш учун зарур бўлган ҳаво миқдори  $V_0$  га нисбати киритилди. Метан-ҳаво аралашмасининг термо- ва газодинамик параметрларини  $\alpha$  коэффициент қийматига қараб аниқлайдиган формулалар олинди.

Қолган маълумотларни сақлаб қолган ҳолда ёқилғи соплоси радиусининг турли қийматлари ва  $\alpha = 0, 0.2, 0.8, 1.0, 1.2$  учун ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди.

$\alpha$  коэффициент қийматининг ошиши билан ҳисоблаш соҳасидаги энг юқори ҳарорат камайиши (9-расм) ва шу туфайли ёнмасдан чиқиб кетадиган газнинг улуши ошиши аниқланди.



## ХУЛОСА

Кимёвий реакциялар кечадиган струяли оқимларнинг хусусиятларини ўрганиш учун ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишга доир диссертация иши натижалари асосида қуйидаги хулосаларга келинди.

Кимёвий ўзгаришли турбулент струяли оқимларни моделлаштириш ва сонли ечишга бағишланган ишларнинг таҳлили ўтказилган ва унинг асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Кимёвий ўзгаришларнинг уч модели: Бурке-Шуман-Шваб-Зельдович, кимёвий мувозанат ва Аррениус қонуни бўйича реакциянинг чекли тезлиги моделлари учун Шваб-Зельдович функциялари ва уларнинг умумлашмаларини киритишнинг хусусиятлари аниқланди. Улардан фойдаланиш  $N$  та компонента учун дифференциал тенгламаларни кам сонли эквивалент тенгламаларга алмаштириш имконини берди: биринчи икки модель учун улар ягона тенгламага, учинчи модель учун иккита тенгламага олиб келинган.

Ўққа нисбатан симметрик струя учун кўп компонентали газнинг турбулент чегаравий қатлами тенгламалари шакли ўлчамсиз ўзгарувчиларга ўтиш ва оқим функциясини (Мизес ўзгарувчилар) киритиш билан соддалаштирилган ва уларни ечиш учун сонли усуллар ишлаб чиқилган.

Чизиқли интерполяция усулини қўллаб, Мизес координатларида жадвал кўринишида берилган функцияни физик координатларда ўзгармас кадам билан ифодалаш усули ишлаб чиқилди.

Прандтлнинг модификация қилинган турбулентлик ва ёнишнинг Бурке-Шуман-Шваб-Зельдович моделлари асосида ўққа нисбатан симметрик турбулент чексиз йўлдош струяда метаннинг диффузион ёниши масаласини тадқиқ қилиш учун сонли усул, алгоритм ва дастурий маҳсулот ишлаб чиқилди.

Турбулент оқимда диффузион ёниш учун  $Pr = Sc_i$  ҳолида Шваб-Зельдович функцияси, нисбий ошиғич катталиклар ва Мизес ўзгарувчиларига ўтиш орқали субстанциялар кўчишининг 8 тенгламалари иккита тенгламага олиб келинган. Ёқилғи таркибига инерт газни кўшиш йўли орқали диффузион аланга параметрларини бошқариш услуги кўрсатилган: кимёвий пассив газ концентрациясининг оширилиши аланга узунлигининг қисқаришига ва ундаги ҳароратнинг камайишига олиб келиши аниқланди.

Турбулентликнинг к-е модели ва Аррениус қонуни асосида чексиз йўлдош ҳавонинг ўққа нисбатан симметрик турбулент струяси метаннинг чекли тезликда ёниши масаласининг математик ва сонли моделлари ишлаб чиқилди. Шваб-Зельдовичнинг оддий ва умумлашган функциялари ва оқим чизиғи функциясини киритиш орқали субстанциялар сақланишининг 10 дифференциал тенгламалари уларга эквивалент бўлган 5 дифференциал тенглама билан ифодаланди.

Аррениус қонунига асосида ёниш масаласини сонли ечиш учун координаталар бўйича иккинчи тартибли аниқликка эга аппроксимация схемасидан фойдаланилди. Бу эса бўйлама координата учун йирик қадамдан фойдаланиш ва ҳисоблаш вақтни анча камайтириш имконини берди.

Ёқилғи соплоси радиуси, ёқилғи аралашмадаги ҳаво улуши ва ҳаво ҳарорати омилларининг ўққа нисбатан симметрик струя ва аланга кўрсаткичларига таъсири ҳисоблаш тажрибаси асосида ўрганилди. Бу кўрсаткичларнинг камайиши газ ҳароратнинг энг катта қийматининг пасайишига, ёнмай қолган ёқилғи миқдорининг ортишига ва газ ёқувчи қурилма фойдали иш коэффициентининг камайишига олиб келиши аниқланди.

Иш натижалари мураккаб объектларни моделлаштириш бўйича фундаментал грантни бажаришда ва юқори фойдали иш коэффициентига эга қурилмаларни ишлаб чиқишда қўлланилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПО  
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ  
МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

---

**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

**Хамдамов Музаффар Мухиддинович**

**ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ  
СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2021**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2019.2.PhD/FM356.**

Диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.

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

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Научный руководитель:</b>  | <b>Хужаев Исматулла Кушаевич</b><br>доктор технических наук, профессор   |
| <b>Официальные оппоненты:</b> | <b>Фатхулов Алишер Мирзатиллоевич</b><br>доктор технических наук, доцент<br><b>Файзиев Раббим Аликулович</b><br>кандидат физико-математических наук, профессор |
| <b>Ведущая организация:</b>   | <b>Самаркандский государственный университет</b>   |

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33, зал заседаний-1. Тел.(99871) 262-71-52; факс: (99871) 262-71-32, e-mail: [instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмостойкости сооружений (зарегистрирована за № \_\_\_\_\_). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.(99871) 262-71-52).

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

**М.М.Мирсаидов**  
Председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.т.н., профессор, академик АН РУз

**М.К. Усаров**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., с.н.с.

**З.М.Маликов**  
Председатель Научного семинара при  
Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.т.н.

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире струйные течения реагирующих сред широко используются в быту, при выработке тепловой и электрической энергии, в камерах внутреннего сгорания, в химических лазерах, в процессах производства ртути и строительных материалов, в силовых установках ракетных двигателей и многих других отраслях техники и производства. В зависимости от цели организации и конструкции устройств сжигания газа возникают различные проблемы управления объектом. В частности, газовая составляющая в мировом энергетическом балансе занимает около 70%. Несмотря на постоянное улучшение показателей устройств сжигания газа, их КПД все еще очень низкий.

В мире, в силу расширения направлений и масштабов внедрения, продолжают широко масштабные исследования течений реагирующих систем. Незаменимым инструментом при изучении различных способов организации процесса сжигания топлива и управления ими являются математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Адекватно построенные математическая модель и численные алгоритмы являются неотъемлемыми составляющими сегодняшнего развития методов познания объектов и управления ими. Математическое моделирование течений реагирующих систем динамично развивается за счет появления новых моделей турбулентности и химических реакций, эффективных численных методов и быстродействующей, мощной вычислительной техники. Реализация этих возможностей при решении многомерных полных уравнений Навье-Стокса и их упрощенных аналогов способствует успешному решению задач сложного тепло-и массообмена, в частности, применительно к задачам сжигания газов в струйных течениях.

В нашей стране большое внимание уделяется развитию различных национальной экономики. В Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы отмечены задачи: «... производство ..., техническое и технологическое обновление ..., дальнейшая модернизация и диверсификация отрасли путем перехода к высоко технологической переработке местного сырья с высокой добавленной стоимостью, ... сокращение потребления энергии и ресурсов в экономике, внедрение энергосберегающих технологий»<sup>1</sup>. Ведутся работы по построению атомных и гидравлических электростанций, полигонов по выработке энергии с использованием солнечной радиации и силы ветра, по реконструкции существующих электростанций. Важна также задача усовершенствования бытовых устройств и систем децентрализованного теплоснабжения, которые употребляют 40% выработанного в республике природного газа и имеют

---

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

достаточно низкий КПД. Данная проблема является общей и актуальной для стран, где используются горючие газы.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит осуществлению задач, определенных Указом Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 3 октября 2018 года «Совершенствование системы государственного управления в сфере экологии и охраны окружающей среды» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в этой области деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика».

**Степень изученности проблемы.** Основные понятия и закономерности турбулентных струйных течений сформированы в монографиях Г.Н.Абрамовича и его учеников (1936, 1940, 1948, 1960, 1974, 1987 гг.), Бай-Ши-и (1960), А.А.Вулиса и учеников (1965, 1968), А.А.Гиневского (1969), A.Ferri, V.Zakkey, L.Alpinieri и других. Результаты исследования турбулентных струйных течений реагирующих газов обобщались в монографиях Ю.В.Лапина и учеников его (1982...). Многочисленные решения струйных задач, включая термики и лесные пожары, получены в работах Ю.А.Гостинцева, Н.Н.Семёнова и их учеников. Отдельные задачи турбулентных струйных течений реагирующих газов рассмотрены в работах Л.Г.Лойцянского, И.С.Макарова, Г.Ф.Кнорре, В.К.Баева, Я.Б.Зельдовича, Н.И.Акатнова, Л.Ю.Артюх, Е.С.Щетинкова, А.Ю.Снегирёва, А.С.Фролова, S.J.Brookes, A.C.Benim, J.B.Mos, T.P.Coffee, Y.H.Chao, K.S.Hui, P.Cheng, K.Y.Chien, S.R.Gollahalli и другие. Задачам проектирования топочных устройств посвящены работы Р.Б.Ахмедова и его учеников.

Достойный вклад в теории струйных течений, турбулентности и реагирующих сред внесли также узбекские ученые. Развитие струйных течений жидкостей и многофазных сред связано с работами А.А.Хамидова, методов расчета турбулентных течений реагирующих газов – с работами Ф.А.Алиева, З.Ш.Жумаева, И.К.Хужаева и их учеников. Новые модели турбулентности предложены в работах К.Ш.Латипова, Ю.М.Денисова, И.Н.Хусанова, З.М. Маликова, А.М.Арифжонова, А.М.Фатхуллаева и других. Несмотря на многочисленные работы в этих областях, вопросы управления процессом горения в струйных течениях изучены фрагментарно.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских работ Института механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз по гранту БВ-М-Ф4-001 «Исследование задач гидродинамики и машиноведения на основе математического моделирования и разработки новых методов решения».

**Целью исследования** является разработка численных методов решения задач турбулентного струйного течения газов и применение их в изучении процессов тепло-и массообмена в условиях химических превращений.

**Задачи исследования:**

на основе обзора литературы изучить модели турбулентности и химических реакций газов;

формирование проблемы диффузионного горения, разработка численных методов и программного обеспечения для ее решения;

численное решение задачи о горении с конечной скоростью в осесимметричном спутном потоке и разработка программного обеспечения;

изучение особенностей факела и струи в зависимости от радиуса сопла горючего, состава газовой смеси и других факторов.

**Объектом исследования** являются процессы сжигания газа в спутном турбулентном потоке воздуха.

**Предметом исследования** являются газодинамические показатели осесимметричной турбулентной струи в условиях горения.

**Методы исследования.** В процессе исследования использованы методы математического моделирования струйных течений, конечных разностей, вычислительного эксперимента и визуализации результатов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

обобщен метод функций Шваба-Зельдовича для отдельного ввода двух составов газов для решения задач в рамках моделей диффузионного горения, химического равновесия между компонентами и при конечной скорости химической реакции;

с привлечением функций Шваба-Зельдовича и переменных Мизеса достигнуто значительное сокращение числа решаемых нелинейных уравнений турбулентного пограничного слоя многокомпонентных реагирующих газов;

разработаны численные методы решения уравнений турбулентного осесимметричного пограничного слоя многокомпонентного газа для диффузионного горения при конечной и бесконечной скорости реакции горения;

разработан способ представления результатов, полученных в поле функции тока, в цилиндрических координатах с заданным постоянным шагом;

вычислительным экспериментом доказано, что уменьшение радиуса сопла горючего и концентрации горючего в газовой смеси, а также увеличение температуры бесконечного спутного потока воздуха приводят к уменьшению наибольшей температуры факела и увеличению объема несгорающего горючего в составе отходящих газов.

**Практические результаты работы** заключаются в разработке методики проведения вычислительного эксперимента по управлению показателями факела путем вариации размера сопла горючего, температуры вводимых газов и состава газовой смеси.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием апробированных моделей химической реакции и турбулентности, обеспечением необходимой точности аппроксимации уравнений и их краевых условий при численном решении и сравнением отдельных результатов с экспериментальными данными других авторов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке численных методов и алгоритма расчета струйных течений с диффузионным горением и горением по закону Аррениуса метана и пропан-бутановой смеси в переменных Мизеса.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке экономичных численных методов, алгоритма замены независимой переменной в результатах при использовании переменных Мизеса для решения задач струйного течения и проведением факторного анализа для диффузионного горения метан-воздушной смеси.

**Внедрение результатов исследования.** В ходе исследования разработанные математические модели, алгоритмы и программные средства для расчета турбулентного струйного течения реагирующих газов:

использованы при выполнении прикладного гранта «ЁФА-Фтех-2018-13» (Справка АН РУз № 2/1255-1011 от 12 апреля 2021 г.). В результате применения переменных Мизеса и функций Шваба – Зельдовича количество решаемых нелинейных дифференциальных уравнений сокращено более чем в два раза, а сложные уравнения аэродинамики приведены к интегро-дифференциальным уравнениям;

использованы в ЧП «Когон иситгич мосламалар» при разработке более экономичных топливосжигающих устройств (Справка АО «Узбекистон миллий электр тармоклари» № 01-04-28/1483 от 28 апреля 2021 г.). В результате использования способа предварительной добавки воздуха к метану достигнута экономия горючего газа на 2-5 %, а при применении теоретически определенного эффективного радиуса сопла достигнута экономия горючего газа на 5 %.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 3 республиканских и 3 международных конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме исследования опубликовано 17 научных трудов. Из них 8 научных статей, в т.ч. 2 в республиканских и 6 в зарубежных журналах (3 в изданиях из базы Scopus), опубликованы в рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, а также получено 3 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 119 страниц.

## 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, обоснована достоверность полученных результатов, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

Первая глава диссертации **«Обзор литературных источников по исследованию течений с химическими реакциями»** состоит из трех параграфов.

В первом параграфе главы обсуждаются струйные течения газов по материалам Г.Н.Абрамовича, Бай Ши-И, А.А.Вулиса, В.П.Кашкарова, Ю.В.Лапина, Ф.А.Алиева, З.Ш.Жумаев, А.С.Фролова, S.J.Brookes, A.C.Benim, J.B.Mos, T.P.Coffee, Y.H.Chao, K.S.Hui, P.Cheng, K.Y.Chien, S.R.Gollahalli и многих других специалисты. При моделировании струйных течений газов используется подход пограничного слоя. Наличие тангенциального разрыва скорости, импульса, плотности, концентраций веществ и температуры приводит к образованию турбулентного режима течения. Отличают затопленную и спутную струй в плоскопараллельных и осесимметричных постановках. Для случаев без горения получены формулы для распределения субстанций для многочисленных задач. Основное внимание при этом требует описание турбулентности, теория которой продолжает развиваться по сей день.

Во втором параграфе описано развитие математических моделей реакции горения в газовых потоках. Перечислены основные модели горения типа горелки Бунзена, диффузионные горения с конечной и бесконечной скоростью горения, модель химического равновесия. Приведены кинетики горения в рамках брутто-реакции и многостадийной реакции с образованием радикалов. Представлены закон Аррениуса для конечной скорости реакции и уравнение химического равновесия.

Одним из основных проблем математического моделирования течений с химическими превращениями являются уравнения сохранения и переноса  $N$  компонент. В третьем параграфе первой главы приведены функции Шваба-Зельдовича и относительно – избыточная концентрация. При горении с бесконечно большой скоростью реакции они позволяют  $N$  уравнениям привести к одному уравнению, эквивалентному  $N$  уравнениям. Описаны варианты использования функций Шваба-Зельдовича для случаев закона Аррениуса и химического равновесия. В первом случае решаются два дифференциальных уравнения, а во втором случае – одно дифференциальное уравнение и трансцендентное уравнение относительно концентраций.

На основе проведенного анализа состояния изученности проблемы и, исходя из насущных проблем в области сжигания газов, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации озаглавлена «**Численный метод расчета осесимметричной турбулентной струи пропан-бутановой смеси при диффузионном горении**». В первом ее параграфе сформулированы физическая и математическая постановки задачи.

Рассматривается струя горячего газа, которая истекает из круглого сопла с диаметром  $2a$  со скоростью  $u_2$  и распространяется в спутном потоке окислителя, скорость которой составляет  $u_1$ .

Картина схематически представлена на рис. 1.

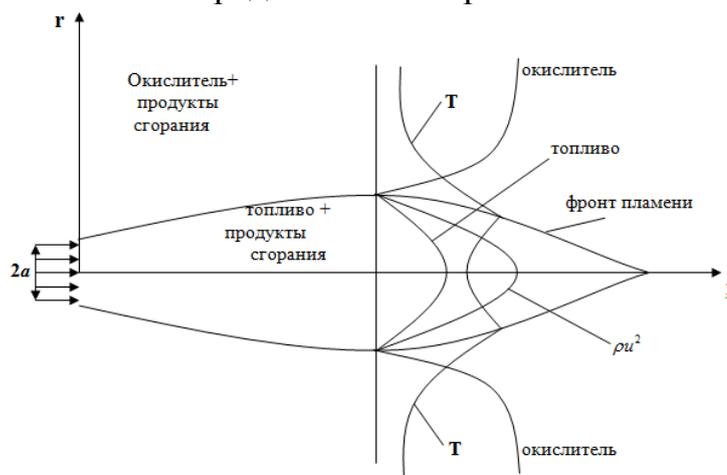


Рис. 1. Схематическое представление струи с факелом

Каждая из отдельно вводимых смесей имеет свой состав и свои теплофизические характеристики. Происходит взаимная диффузия газов и на тонкой поверхности фронта пламени активные газы вступают в реакцию. Скорость реакции считается достаточно большой так, что горючее не проникает в зону воздуха, а кислород находится только в зоне окислителя. Продукты реакции и химически пассивные газы могут находиться и в области горючего, и в области окислителя. Поступления горючего и окислителя к фронту пламени происходят согласно стехиометрическому уравнению реакции горения.

Математическая модель задачи построена на основе применения новой модификации гипотезы Л. Прандтля для кинематического коэффициента турбулентной вязкости ( $m^2 c^{-1}$ ):

$$v_t = \chi b(x) |u_{\max} - u_{\min}|_x, \quad (1)$$

где  $b(x)$  – ширина струи в сечении  $x$ , исчисляемая от оси струи;  $u_{\max}$ ,  $u_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения продольной составляющей вектора скорости в сечении  $x$ .

Наличие тангенциального разрыва показателей течений на их общей границе и высокотемпературного пламени в области интенсивного тепло- и массообмена обуславливает турбулентность течения в рассматриваемой области. Так как есть преимущественное направление движения газов, то при

описании процесса можно использовать уравнения турбулентного пограничного слоя с условием  $Le_i = 1$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho g \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial u}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho g r)}{\partial r} = 0, \\ \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho g \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{Pr r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial}{\partial r} \left( H - (1 - Pr) \frac{u^2}{2} \right) \right), \\ \rho u \frac{\partial c_k}{\partial x} + \rho g \frac{\partial c_k}{\partial r} = \frac{1}{Sc r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial c_k}{\partial r} \right) + \omega_k \quad (k=1..N); \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $u, v$  – осредненные продольная и радиальная составляющие вектора скорости ( $м\ c^{-1}$ );  $x, r$  – продольная и радиальная координаты ( $м$ );  $\rho, T$  – плотность ( $кг\ м^{-3}$ ) и абсолютная температура ( $К$ ) газовой смеси;  $p$  – давление ( $Па$ );  $Pr, Sc$  – турбулентные аналоги чисел Прандтля и Шмидта;  $c_k$  – массовая концентрация  $k$ -й компоненты газа в смеси ( $кг\ кг^{-1}$ );  $\omega_k$  – массовая скорость образования/исчезновения  $k$ -й компоненты газа ( $кг\ м^{-3}\ c^{-1}$ ).

Газовая смесь принимается совершенной, поэтому ее состояние удовлетворяет уравнению Менделеева-Клапейрона

$$p = \rho R_0 T / m, \quad (3)$$

где  $m = \left( \sum_{k=1}^N c_k / m_k \right)^{-1}$  и  $m_k$  – молярные массы газовой смеси и  $k$ -й компоненты газа ( $кг\ моль^{-1}$ );  $R_0$  – универсальная газовая постоянная ( $8.341\ Дж\ моль^{-1}\ К^{-1}$ ).

Полная энтальпия газовой смеси ( $Дж\ кг^{-1}$ ) имеет вид

$$H = c_p T + \frac{U^2}{2} + \sum_{k=1}^N c_k h_k^*, \quad (4)$$

где  $c_p = \sum_{k=1}^N c_{pk} c_k$  и  $c_{pk}$  – теплоемкости газовой смеси и  $k$ -й компоненты при постоянном давлении ( $Дж\ кг^{-1}\ К^{-1}$ );  $U^2 / 2 \approx u^2 / 2$  – кинетическая энергия газовой смеси единичной массы в приближении теории пограничного слоя;  $h_k^*$  – теплотворная способность  $k$ -й компоненты ( $Дж\ кг^{-1}$ ).

Граничные условия задачи для входного сечения  $x=0$  задаются в следующем виде:

$$\text{при } 0 \leq r \leq a: u(0, r) = u_2, \quad T(0, r) = T_2, \quad c_k(0, r) = (c_k)_2;$$

$$\text{при } a < r \leq r_\infty: u(0, r) = u_1, \quad T(0, r) = T_1, \quad c_k(0, r) = (c_k)_1.$$

При  $x > 0$  на оси струи задаются условия непротекания:

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(x,0)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial c_k(x,0)}{\partial r} = 0, \quad v(x,0) = 0,$$

а на границе струи  $r = b(x)$  – согласно показателям спутного потока:

$$u(x,r) = u_1, \quad T(x,r) = T_1, \quad c_k(x,r) = (c_k)_1.$$

Граничные условия для полной энтальпии определяются согласно формуле (4).

Во втором параграфе описан способ приведения уравнений сохранения компонентов к единому уравнению для диффузионного горения.

Полагаем, что в горючей смеси пропан и бутан имеют равные концентрации. При этом стехиометрическое уравнение процесса можно записать в виде:



где стехиометрические коэффициенты  $\nu_1 = 5.75$ ,  $\nu_2 = 1$ ,  $\nu_3 = 3.5$ ,  $\nu_4 = 4.0$  моль относятся кислороду, горючему, окиси углерода и водяному пару,  $h_2^* = 45000$  кДж/кг. Кроме того, учитывается наличие пятой компоненты – молекулярного азота  $N_2$ , который считается химически пассивной компонентой.

Уравнения сохранения компонент сокращенно записываются в виде:

$$L(c_k) = \omega_k \quad (k = 1..5), \quad (5)$$

где  $L(c_k) = \rho u \frac{\partial c_k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_k}{\partial r} - \frac{1}{Sc r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \nu_l r \frac{\partial c_k}{\partial r} \right)$  – линейный и однородный относительно своего аргумента – массовой концентрации  $k$ -й компоненты  $c_k$  – оператор.

Для скоростей химической реакции имеют места следующие зависимости

$$\begin{aligned} \omega_3 \nu_k m_k + \omega_k \nu_3 m_3 &= 0 \quad \text{при } k = 1, 2; \\ \omega_3 \nu_k m_k - \omega_k \nu_3 m_3 &= 0 \quad \text{при } k = 4; \end{aligned} \quad (6)$$

где учитывали  $\omega_1, \omega_2 \leq 0$ ,  $\omega_3, \omega_4 \geq 0$ .

При введении функций Шваба-Зельдовича согласно (6)

$$\tilde{c}_k = \begin{cases} c_3 \nu_k m_k + c_k \nu_3 m_3 = 0 & \text{при } k = 1, 2; \\ c_3 \nu_k m_k - c_k \nu_3 m_3 = 0 & \text{при } k = 4, \end{cases} \quad (7)$$

уравнения сохранения компонент (5) при  $k = 1, 2, 4$  приобретают безысточниковый вид

$$L(\tilde{c}_k) = 0. \quad (8).$$

Уравнение для концентрации инертного газа, так как  $\omega_5 = 0$ , также имеет аналогичный вид  $L(c_5) = 0$ . Т.е. рассматриваются четыре дифференциальные уравнения для пяти концентраций компонентов. Не учтенное уравнение заменяется допущениями модели диффузионного горения.

Составлены граничные условия для введенных функций  $\tilde{c}_k$  и введена относительно-избыточная концентрация

$$\tilde{C} = \frac{\tilde{c}_k - (\tilde{c}_k)_1}{(\tilde{c}_k)_2 - (\tilde{c}_k)_1} = \frac{c_5 - (c_5)_1}{(c_5)_2 - (c_5)_1} \quad (9)$$

для  $k = 1, 2, 4$  и  $5$ .

Доказано, что уравнение  $L(\tilde{C}) = 0$  эквивалентно уравнениям (5) при  $k = 1, 2, 4$  и  $5$ , и получены формулы для определения местоположения фронта пламени

$$\tilde{C}^* = \left[ 1 + \frac{(c_2)_2}{(c_1)_1} \frac{v_1 m_1}{v_2 m_2} \right]^{-1}$$

и концентраций компонент в зоне горючего, где, согласно основе допущений модели, отсутствует окислитель, и в зоне окислителя, где отсутствует горючий газ.

В третьем параграфе с помощью характерных величин  $a, u_2, H_2, \rho_2$  произведен переход к безразмерным переменным:  $\bar{x} = \frac{x}{a}, \bar{y} = \frac{y}{a}, \bar{u} = \frac{u}{u_2}, \bar{v} = \frac{v}{u_2}$ ,

$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{a u_2}, \bar{H} = \frac{H}{H_2}, \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_2}, \bar{T} = \frac{T}{T_2}, \bar{p} = \frac{p}{\rho_2 u_2^2}, \bar{h}_2^* = \frac{h_2^*}{H_2}$  и переменным Мизеса.

Тогда уравнения принимают вид (надчеркивания над безразмерными величинами опущены):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \vartheta r)}{\partial r} = 0, \\ \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{\text{Pr} r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial}{\partial r} \left( H - (1 - \text{Pr}) \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 u^2 \right) \right) \\ \rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho \vartheta \frac{\partial \tilde{C}}{\partial r} = \frac{1}{\text{Sc} r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho v_r r \frac{\partial \tilde{C}}{\partial r} \right). \end{array} \right.$$

Уравнение состояния газовой смеси приобретает вид  $\bar{\rho} = \frac{m}{(m)_2 \bar{T}}$ .

Переход к переменным Мизеса, где введена функция тока  $\psi$ , осуществлен согласно соотношениям:

$$\rho u r = \psi \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \rho \vartheta r = -\psi \frac{\partial \psi}{\partial r}.$$

Необходимое для расчета значение поперечной координаты находили по формуле  $\frac{r^2}{2} = \int_0^\psi \frac{\psi d\psi}{\rho u}$ . Переход от координат  $(x, r)$  к координатам  $(\xi, \psi)$

осуществляется по формулам:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{r}{\psi} \rho \vartheta \frac{\partial}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial}{\partial r} = \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial \psi} = \frac{r}{\psi} \rho u \frac{\partial}{\partial \psi}.$$

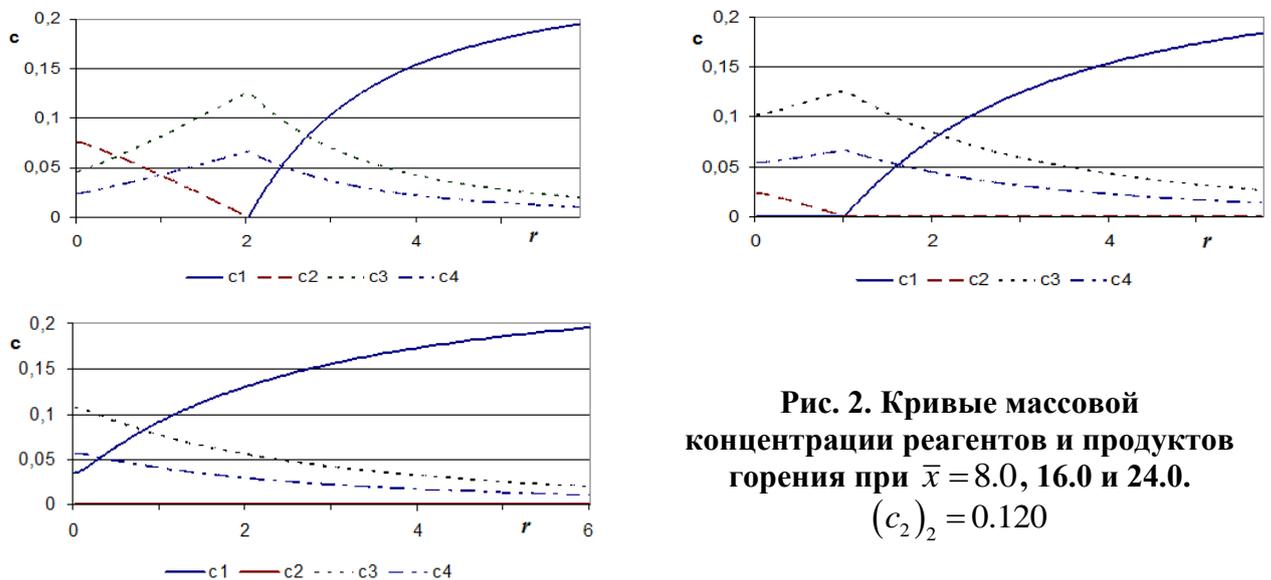
Вместо системы из восьми уравнений построена система:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_i u}{\psi} \left( 2 \int_0^{\psi} \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) \frac{\partial u}{\partial \psi} \right], \\ \frac{\partial H}{\partial \xi} = \frac{1}{\text{Pr} \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_i u}{\psi} \left( 2 \int_0^{\psi} \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H - f u^2) \right], \\ \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \xi} = \frac{1}{\text{Sc} \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{\rho^2 v_i u}{\psi} \left( 2 \int_0^{\psi} \frac{\psi d\psi}{\rho u} \right) \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \psi} \right]. \end{cases}$$

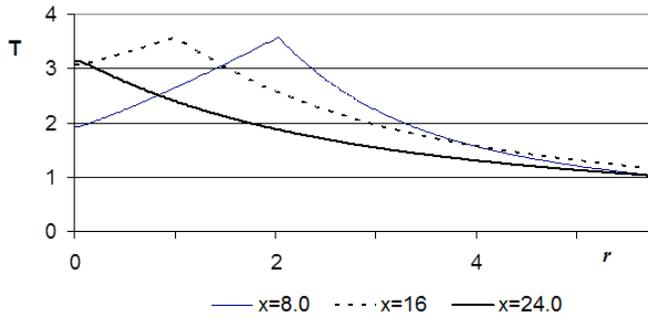
Здесь и далее  $f = (1 - \text{Pr}) \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2$ .

В четвёртом параграфе приведены численный метод и алгоритм решения задачи. Для решения задачи в координатах Мизеса использована двухслойная, четырехточечная неявная конечно-разностная схема, обеспечивающая первый порядок точности по продольной координате и второй порядок точности – по поперечной координате. В силу нелинейности уравнений сохранения и переноса субстанций и неизвестности границы струи использовали итерационный процесс. Выбраны шаги интегрирования, обеспечивающие сходимость вычислительного процесса.

В пятом параграфе представлены результаты вычислительного эксперимента по диффузионному горению и их анализ.



**Рис. 2. Кривые массовой концентрации реагентов и продуктов горения при  $\bar{x} = 8.0, 16.0$  и  $24.0$ .  $(c_2)_2 = 0.120$**



**Рис. 3. Изменение безразмерной температуры в сечениях  $\bar{x} = 8.0, 16.0$  и  $24.0$ , полученные при  $(c_2)_2 = 0.120$**

Массовый состав воздуха задавали в виде  $(c_1)_1 = 0.232$ ,  $(c_5)_1 = 0.768$ . В состав горючей смеси входили пропанобутановая смесь и азот. Скорость основного потока составила 60 м/с ( $M_2 \approx 0$ ), а спутного потока – 18.3 м/с. Температура воздуха –  $T_1 = 297\text{ K}$ , а горючей смеси –  $T_2 = 600\text{ K}$ , радиус сопла горючего –  $a = 0.01\text{ м}$ .

На рис. 2 и 3 приведены графики концентраций реагентов и продуктов горения, а также безразмерной температуры, которые получены при  $(c_2)_2 = 0.120$  в различных сечениях. В этом случае место фронта пламени определили из равенства  $\tilde{C} = \tilde{C}^*$  ( $= 0.349348$ ). Температура на фронте пламени составляла 2144.93 K.

В шестом параграфе представлены численные результаты изучения осесимметричной струи метана с диффузионным горением в рамках  $k - \varepsilon$  модели турбулентности:

$$\begin{cases} \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho g \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{1}{\delta_k r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho r v_t \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \varepsilon, \\ \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho g \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{1}{\delta_\varepsilon r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho r v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \dot{c}_1 \frac{\varepsilon}{k} G - \dot{c}_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь  $v_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon}$ ,  $G = 4\rho v_t \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2$ ,  $\dot{c}_1 = 1.44$ ,  $\dot{c}_2 = 1.92$ ,  $c_\mu = 0.09$ ,  $\delta_k = 1$ ,  $\delta_\varepsilon = 1.3$ ,

Обозначение  $k$  соответствует кинетической энергии пульсационного движения единичной массы газа, а  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии турбулентности. В качестве входных данных принимали  $k = 0.007u^2$ ,  $\varepsilon = \frac{0.001k^2}{0.3}$ ,  $v_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon}$ .

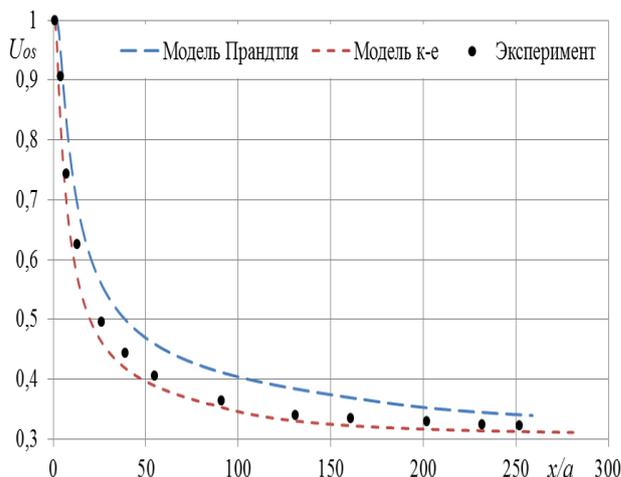
Молярные массы компонентов составляли  $m_1 = 32.000$ ,  $m_2 = 16.043$ ,  $m_3 = 44.011$ ,  $m_4 = 18.020$ ,  $m_5 = 28.016$  г/моль, а стехиометрические коэффициенты для представленной брутто-реакции



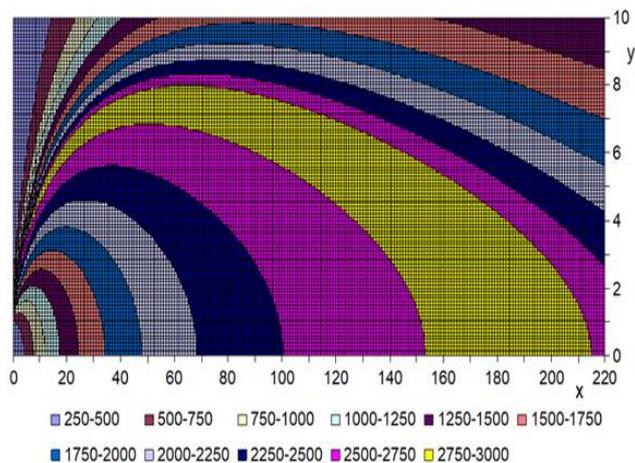
составили  $\nu_1 = 2$ ,  $\nu_2 = 1$ ,  $\nu_3 = 1$ ,  $\nu_4 = 2$ ,  $\nu_5 = 0$  моль. В состав горючего газа входили метан и азот. Остальные показатели объекта брали как в предыдущем параграфе.

Сравнение результатов расчетов по изменению осевой скорости потока согласно двум моделям турбулентности и экспериментальными данными из произведено на рис. 4.

Расчеты показали, что с увеличением температуры горючего газа длина факела уменьшается и температура возрастает, а увеличение температуры воздуха приводит к удлинению факела. В частности, при  $T_1 = 600\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$  максимальная температура составила  $T^* = 3078.43\text{ K}$ , а длина факела составляет  $224.9a$  (рис. 5). Для случая  $T_1 = 400\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$  получили  $T^* = 2910.44\text{ K}$  и  $203.7a$  соответственно.



**Рис. 4. Изменение осевого значения безразмерной продольной скорости**  
 $T_1 = 297\text{ K}, T_2 = 600\text{ K}, u_2 = 61\text{ м/с}$



**Рис. 5. Изотермы при диффузионном горении метана при  $T_1 = 600\text{ K}, T_2 = 300\text{ K}$**

Третья глава диссертации «Численный метод расчета осесимметричной турбулентной струи метана в спутном потоке воздуха при горении с конечной скоростью» состоит из четырех параграфов.

В первом параграфе главы описана математическая модель задачи о осесимметричной струе с конечной скоростью реакции с привлечением  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Рассматривается струя горючей смеси метана с воздухом, которая истекает из круглого сопла с диаметром  $2a$  и распространяется в спутном потоке воздуха при конечной скорости химической реакции.

При моделировании объекта привлечены уравнения (2), (12) с соответствующими замыкающими соотношениями и граничными условиями.

Во втором параграфе главы описан способ введения относительно избыточных функций Шваба-Зельдовича для случая конечной скорости химической реакции. Согласно работе [Фролова и учеников], скорость реакции метана с кислородом имеет вид:  $\omega_2 = -An_1^2 n_2 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ , где  $A = 1.35 \cdot 10^{20}$ ,  $E_a = 3.00 \cdot 10^4$ ,  $n_1, n_2$  – объемные концентрации окислителя и горючего газа.

Введением обобщенной функции Шваба-Зельдовича из пяти уравнений сохранения компонент составлены два уравнения, которые эквивалентны исходным уравнениям (5) для концентраций.

Процесс сжигания газового горючего проводится в достаточно малых относительно скорости звука скоростях. Поэтому в выражении полной энтальпии можно пренебрегать кинетической энергией газа. Тогда аналогичную введенной для концентрации замену можно использовать и применительно к полной энтальпии, что приводит к нормированию полной энтальпии

$$\tilde{H} = \frac{H - H_1}{H_2 - H_1} = \tilde{C}.$$

$$\text{Здесь } H_1 = (c_p)_1 T_1 + (c_2)_1 h_2^*, \quad H_2 = (c_p)_2 T_2 + (c_2)_2 h_2^*.$$

При этом значения температуры и плотности смеси газов вычисляются по формулам:

$$T = (H - c_2 h_2^*) / c_p = \left[ H_1 + (H_2 - H_1) \tilde{H} - c_2 h_2^* \right] / \sum_{n=1}^N c_{pn} c_n, \quad \rho = \frac{p}{R_0 T \sum_{n=1}^N c_n / m_n}.$$

В третьем параграфе осуществлены переход к безразмерным переменным Мизеса и дискретизация уравнений и условий. В результате введения относительно-избыточной функции и переменных Мизеса десять дифференциальных уравнений заменены пятью эквивалентными уравнениями.

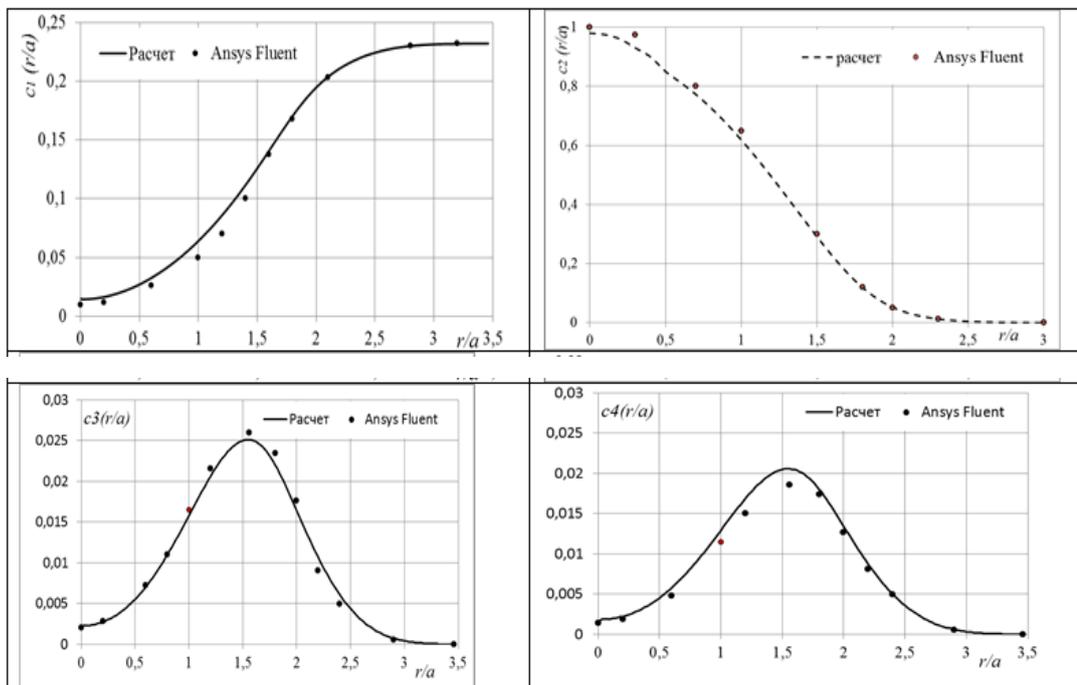


Рис. 6. Графики массовых концентраций компонентов при  $x/a = 5$

В четвёртом параграфе представлены результаты расчета отдельной задачи. В качестве горючего рассматривали метан без примесей. Скорость

основного потока составила 61 м/с, а потока воздуха – 18.3 м/с. Температура воздуха и горючей смеси –  $T_1 = T_2 = 293.15 \text{ K}$ , а радиус сопла  $a=0.01 \text{ м}$ .

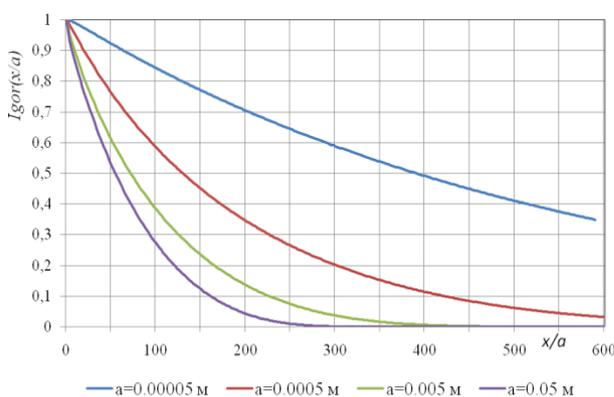
Отметим, что каждый расчет повторяли в программной среде Ansys Fluent 6.3 и сравнивали результаты двух расчетов.

Получено типичное поле массовых концентраций компонент. На рис. 6 произведено их сравнение при  $x/a = 5$ .

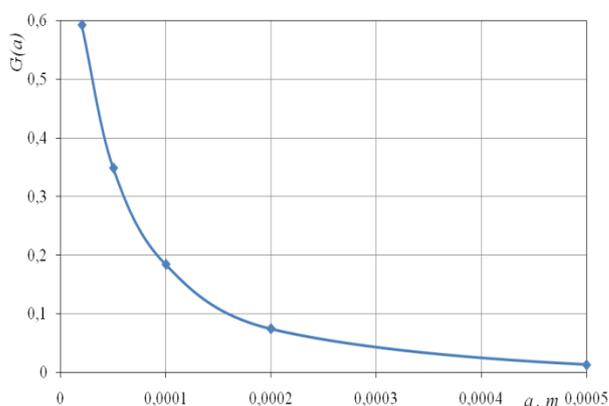
Четвертая глава «Вычислительный эксперимент по исследованию влияния отдельных факторов на процессы тепло- и массообмена в струйном течении метана с горением» состоит из трех параграфов. В целях системного изучения особенностей одиночной струи метана в спутном потоке воздуха в данной главе проводили широкомасштабный вычислительный эксперимент. Составленное программное средство использовали для изучения влияния диаметра сопла горючего, исходной концентрации метан – воздушной смеси, а также температуры воздуха на показатели струи и факела.

В первом параграфе исследовано влияние диаметра сопла горючего газа на показатели струи. Получены численные результаты по полной энтальпии, продольной скорости, концентрации компонентов и поле изотерм для значений радиуса сопла  $a$ : 0.05, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001, 0.0005, 0.0002, 0.0001 м. При этом скорость, состав и температура вводимых воздуха и горючего газа (метана), остались теми, которые использованы в главе III.

На рис. 7 приведены кривые выгорания, которые демонстрируют часть массы горючего, несгоревшей до данного сечения струи метана, при различных значениях радиуса сопла горючего. Они показывают, что при больших радиусах сопла происходит более полное сгорание горючего. Конец факела определяли из условия  $\tilde{H}_{осб} = 0.02$ . На рис. 8 представлена доля несгоревшего горючего газа в конце факела в зависимости от радиуса сопла.



**Рис. 7. Кривые выгорания горючего при различных радиусах сопла**



**Рис. 8. Доля несгоревшего горючего газа в конце факела в зависимости от радиуса сопла**

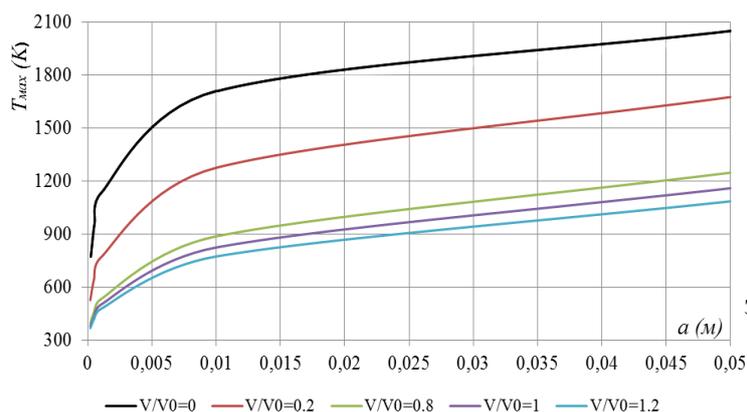
Во втором параграфе главы изучено влияние входной температуры воздуха на показатели факела и струи. Природа выявленных особенностей факела объясняется, в основном, двумя факторами. С увеличением

температуры воздуха в зону горения подается более разреженный газ; плотность воздуха, соответственно, и объем вступающего в реакцию кислорода, уменьшается. За счет этого происходят удлинение факела и увеличение объемной доли исходной горючей массы в отходящих газах.

В третьем параграфе в качестве горючего газа рассматривается метановоздушная смесь. Введен аналог коэффициента избытка воздуха  $\alpha = V / V_0$ , который означает отношение количества фактически подаваемого с горючим воздуха  $V$  к теоретически необходимому количеству воздуха  $V_0$  для полного сгорания горючего. Получены формулы для определения термо-, газодинамических показателей метан-воздушной смеси в зависимости от значения коэффициента  $\alpha$ .

Проведен вычислительный эксперимент для значений  $\alpha = 0, 0.2, 0.8, 1.0, 1.2$  и различных значений радиуса сопла горючего при сохранении остальных входных данных.

Выявлено, что с увеличением значения коэффициента  $\alpha$  наибольшая температура в области расчета убывает (рис. 9), и тем самым увеличивается доля несгоревшего горючего в составе отходящего газа.



**Рис. 9. Изменение наибольшего значения температуры в струе в зависимости от радиуса сопла горючей смеси при различных значениях коэффициента избытка воздуха**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов диссертационной работы по разработке алгоритмов расчета для изучения особенностей струйного течения с химическими превращениями сделаны следующие выводы.

Проведен обзор работ, посвященных моделированию и численному решению задач турбулентных струйных течений с химическими превращениями, на основе которого сформулированы цель и задачи исследования.

Выявлены особенности введения функций Шваба-Зельдовича и их обобщений при изучении потоков с химическими превращениями в рамках трех моделей: Бурке-Шумана-Шваба-Зельдовича, химического равновесия и конечной скорости реакции по Аррениусу. Использование их позволило  $N$  дифференциальные уравнения для концентраций химических компонентов заменить на эквивалентные уравнения: одно уравнение – для двух первых и два уравнения – для третьей модели горения.

Уравнения турбулентного пограничного слоя многокомпонентного газа для осесимметричной струи преобразованы с переходом к безразмерным переменным и введением функции тока (переменных Мизеса), для решения которых разработаны численные методы.

С привлечением метода линейной интерполяции разработан численный метод перехода к физическим координатам функции с заданным постоянным шагом представления, таблично заданной функции в координатах Мизеса.

Для исследования задачи диффузионного горения метана в осесимметричной турбулентной струе в бесконечном спутном потоке воздуха в рамках новой модификации модели турбулентности Прандтля и модели Бурке-Шумана-Шваба-Зельдовича разработаны численный метод, алгоритм решения и программный продукт.

При условии  $Pr = Sc_i$  в диффузионном горении в турбулентном потоке с использованием функций Шваба-Зельдовича, относительно избыточных величин и переменных Мизеса восемь уравнения переноса субстанций приведены к двум уравнениям. Показан способ управления параметрами диффузионного факела путем добавки инертного газа в состав горючего: увеличение концентрации химически пассивного газа приводит к сокращению длины факела и уменьшению температуры в нем.

В рамках  $k - \varepsilon$  модели турбулентности и закона Аррениуса разработаны математическая и численная модели задачи о турбулентной осесимметричной струе метана в бесконечном спутном потоке воздуха при конечной скорости реакции. Введением обычных и обобщенных функций Шваба-Зельдовича, а также функции тока десять дифференциальных уравнений сохранения субстанций представлены эквивалентными им пяти дифференциальными уравнениями.

Для численного решения задачи горения по закону Аррениуса использована аппроксимация со вторым порядком точности по расчетным координатам. Это позволило значительно сократить время расчета за счет использования крупного шага расчета для продольной координаты.

Вычислительным экспериментом исследовано влияние радиуса сопла горючего, добавки воздуха к горючему и температуры воздуха на показатели осесимметричной струи и факела. Выявлено, что при уменьшении этих показателей наблюдается уменьшение наибольшего значения температуры газа, что приводит к увеличению недожога горючего и убыванию КПД горелки.

Результаты работы использованы при выполнении фундаментального гранта по моделированию сложных объектов, а также при разработке горелочных устройств с высоким КПД.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 02/30.12.2019.T/FM.61.01 AWARDING THE  
SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND  
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES**

---

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF  
STRUCTURES**

**Hamdamov Muzaffar Muhiddinovich**

**NUMERICAL ALGORITHMS FOR CALCULATING TURBULENT JET  
FLOWS OF REACTING GASES**

**01.02.05 – Mechanics of liquid and gas**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON PHYSIC AND MATHEMATICS SCIENCES**

**Tashkent – 2021**

**The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2019.2.PhD/FM356**

The dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council ([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).)

**Scientific adviser:** **Khujaev Ismatulla Kushayevich**  
Doctor of Technical Sciences, professor

**Official opponents :** **Fatxulloev Alisher Mirzattilloevich**  
Doctor of Technical Sciences, docent

**Fayziev Rabbim Alikulovich**  
candidate of Physical-Mathematical Sciences, professor

**Leading organization:** **Samarkand state university**

Defense will take place « » december 2021 at at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 33, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail:[instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz)).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number №. ). (Address: 100125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 33. Tel. (99871) 262-71-52).

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

**M.M.Mirsaidov**  
Chairman of the Scientific Council  
for awarding scientific degrees, doctor  
of technic sciences, professor,  
academician

**M.K.Usarov**  
Scientific secretary of Scientific Council  
for awarding scientific degrees, doctor of  
technic sciences

**Z.M.Malikov**  
Chairman of the council seminar at the  
Scientific Council for the awarding  
degrees, doctor of technic sciences

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research** development of numerical methods for solving problems of turbulent jet flow of gases and their application in the study of heat and mass exchange processes under conditions of chemical transformations.

**The object of the research work** these are the processes of gas combustion in a satellite turbulent air flow.

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

the method of the Schwab-Zeldovich functions for the separate input of two gas compositions is generalized for solving problems in the framework of models of diffusion gorenje, chemical equilibrium between components and at a finite rate of chemical reaction;

with the use of the Schwab-Zeldovich functions and Mises variables, a significant reduction in the number of solved nonlinear equations of the turbulent boundary layer of multicomponent reacting gases is achieved;

Gorenje developed numerical methods for solving the equations of a turbulent axisymmetric boundary layer of a multicomponent gas for diffusive combustion at finite and infinite rates of the combustion reaction;

a method for representing the results obtained in the current function field in cylindrical coordinates with a given constant step is developed;

a computational experiment has proved that a decrease in the radius of the fuel nozzle and the fuel concentration in the gas-air mixture, as well as an increase in the temperature of the infinite satellite air flow, lead to a decrease in the maximum temperature of the flare and an increase in the volume of non-combustible fuel in the exhaust gases.

**Implementation of research results.** In the study, mathematical models, algorithms, and software tools for the calculation of the turbulent jet flow of reactive gases:

used in the application of the grant "the YOFA-FTeh-2018-13" (certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan № 2/1255-1011 April 12, 2021). The result of the application of Mises variables and functions of the Schwab-Zeldovich number of solvable nonlinear differential equations is reduced by more than half, and the complex equations of aerodynamics reduced to integro-differential equations.

used in the State of emergency "Kogon isitgich moslamalar" in the development of more fuel-efficient combustion devices (Reference of JSC "Uzbekistan Millii Elektr tarmoklari" No. 01-04-28/1483 dated April 28, 2021). As a result of using the method of preliminary air addition to methane, fuel gas savings of 2-5% were achieved, and when using a theoretically defined effective nozzle radius, fuel gas savings of 5% were achieved.

**Volume and structure of dissertation.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of used sources and applications. The dissertation is 119 pages long.

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

**I-бўлим (I часть; I part)**

1. Хужаев И.К., Ҳамдамов М.М., Абдусатторов С.Ш. Численный метод решения задачи об осесимметричной турбулентной струе пропанобутановой смеси при диффузионном горении // Проблемы вычислительной и прикладной математики. –Ташкент, 2018. №3. – С. 62-78. (01.00.00; № 9)
2. Хужаев И.К., Ҳамдамов М.М., Боборахимова М.И., Каримов Р.С. Численный метод расчёта осесимметричных турбулентных струй реагирующих газов при диффузионном горении на основе модифицированной модели турбулентности // The Way of Science International Scientific Journal. 2018. vol. i. № 11 (57). – С. 61-68. (Global Impact Factor, № 5)
3. Khojaev I.K., Hamdamov M.M. Results of numerical experiments on diffusion combustion of methane in a symmetric turbulent stream against axis // Евразийское научное объединение: Перспективы модернизации современной науки, LV Международная научная конференция. – М. 2019. № 9(55) Сентябрь, – С. 1–4. . (Global Impact Factor, № 5)
4. Хужаев И.К., Ҳамдамов М.М. Ўққа нисбатан симметрик турбулент оқимда метаннинг диффузион ёнишига доир сонли тажриба натижалари // Бухоро Давлат университети Илмий ахбороти. Бухоро, 2019 г. №3 (75)– Б. 59–65. (01.00.00; № 3)
5. Khojaev I.K., Hamdamov M.M. Numerical results of diffusion combustion in turbulent flow Of reacting gases // International Engineering Journal for Research & Development. 2020. Vol.5. Issue 3. P. 1–18. (Open Academic Journals Index, № 17)
6. Khojaev I.K., Hamdamov M.M. Numerical Results of Diffusion Combustion in Turbulent Flow of Reacting Gases // International Journal of Advanced Science and Technology. Vol. 29. 2020. No. 9s, P. 2060–2074 ( Scopus, № 3 ).
7. Khojaev I.K., Hamdamov M.M. Numerical Method for Calculating Axisymmetric Turbulent Jets of Reacting Gases During Diffusion Combustion // Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems. Vol. 12. 07-Special Issue, 2020. 20 May 2020/Accepted: 20 June 2020 ( Scopus, № 3 ).
8. Hamdamov M., Khujaev I., Bazarov O., Isabaev K. Axisymmetric turbulent methane jet propagation in a wake air flow under combustion at a finite velocity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering IPICSE, 2020. IOP Publishing. – P. 1-18 ( Scopus, № 3 ).

## II-бўлим (II часть; II part)

9. Хужаев И.К., Хамдамов М.М. Метод расчёта осесимметричной турбулентной струи с диффузионным горением пропанобутановой смеси // International Conference on importance of Information- Communication technologies in innovative development of sectors of economy. Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi. 2018. 5-6 April. – С. 120–124.

10. Хамдамов М.М. Способ сокращения количества уравнений сохранения массы компонентов при конечной скорости химической реакции / Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари» Халқаро илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. Андижон, 2019 йил 15 апрель. –69–72. б.

11. Хамдамов М.М. Численный метод для решения уравнений турбулентного осесимметричного пограничного слоя в переменных Мизеса // Ажиниёз номидаги Нукус давлат педагогика университетида «Фан ва таълим-тарбиянинг долзарб масаллари» мавзусида ўтказилган республика илмий-назарий анжумани”. Нукус, 2019 йил 27–28 март. – 47–49 б.

12. Хамдамов М.М. Метод расчёта турбулентной осесимметричной струи при конечной скорости химической реакции // 2019 йил 28-февраль куни “XXI асрда илм-фан тараққиётининг ривожланиш истикболлари ва уларда инновацияларнинг тутган ўрни” мавзусидаги Республика илмий онлайн конференциясида. Бухоро, 2020. 186 –189 б.

13. Хамдамов М.М., Боборахимова М.И. Способ сокращения количества уравнений сохранения массы компонентов при конечной скорости химической реакции // Вып. 47, 31 травня. Переяслав – Хмельницький, 2019 .С. 428–430 .

14. Хамдамов М.М. Турбулентликни к-е модели ёрдамида топиш ва пропаннинг диффузион ёнишига доир сонли тажриба натижалари // Materials of International Scientific Conference "Innovative solutions of engineering and technological problems of modern production". 2 том 14-16 ноября 2019 г. – Бухара, 2019. – Б.212–215.

15. Хужаев И.К., Хамдамов М.М. Программное средство «Расчет пламени метана в осесимметричной турбулентной струе при конечной скорости химической реакции» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 09256. 15.09.2020 г.

16. Хужаев И.К., Хамдамов М.М. Программное средство «Программа для расчёта диффузионного пламени метана в осесимметричной турбулентной спутной струе» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06832. 20.06.2019 г.

17. Хужаев И.К., Хамдамов М.М. Программное средство «Расчет пламени метановоздушной смеси в осесимметричной турбулентной струе при конечной скорости химической реакции» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 10788. 17.03.2021 г.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари  
«Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари» илмий журнали  
тахририятида таҳрирдан ўтказилди (15.06.2021 й).

Босишга рухсат этилди: 23.06.2021 йил.  
Бичими  $60 \times 84^{1/16}$ , «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулидан босилди.  
Шартли босма табағи: 2,9. Адади 100. Буюртма № 72.  
Тел (99) 832-99-79; (97) 815-44-54.  
Гувоҳнома reestr № 10-3279  
«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмаҳонасида чоп этилган.  
100031, Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси, 6-уй.