

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSC.13/30.12.2019.T.07.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

XODJIYEV SAFAR

**ICHKI VA TASHQI FAZOVIIY TURBULENT REAKSIYAGA
KIRISHUVCHI OQIMLARDA ISSIQLIK VA MASSA ALMASHUVI
JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH VA SONLI TADQIQ**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

**Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati dissertatsiyasi avtoreferati
mundarijasi**

Оглавление автореферата докторской (DSc)

Contents of the abstract of doctoral (DSc) dissertation

Xodjiyev Safar

Ichki va tashqi fazoviy turbulent reaksiyaga kirishuvchi oqimlarda issiqlik va massa almashuvi jarayonlarini modellashtirish va sonli o'rganish3

Ходжиев Сафар

Моделирование и численное исследование процессов тепло- и массообмена внутренних и внешних пространственных турбулентных струй реагирующих газов.....26

Khodjiev Safar

Modeling and numerical study of heat and mass transfer processes of internal and external spatial turbulent jets of reacting gases.....51

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works.....55

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSC.13/30.12.2019.T.07.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

XODJIYEV SAFAR

**ICHKI VA TASHQI FAZOVIIY TURBULENT REAKSIYAGA
KIRISHUVCHI OQIMLARDA ISSIQLIK VA MASSA ALMASHUVI
JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH VA SONLI TADQIQOTI**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Tenika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.4.DSc/T564 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Buxoro davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus va ingliz (rezyume) ilmiy kengash veb-sahifasida (www.tuit.uz) va "ZiyoNet" Axborot- ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi: **Aripov Mersaid Mirsiddiqovich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Xujaev Ismatulla Kushayevich**
texnika fanlari doktori, professor

Hayotov Abdullo Rahmonovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Djumanov Jamoljon Xudoyqulovich
texnika fanlari doktori, professor

Yetakehi tashkilot: **Toshkent davlat transport universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti huzuridagi DSc.13/30.12.2019.T.07.01 raqamli ilmiy kengashning 2024 yil «12» 09 da soat 14 da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100084, Toshkent shahri, Amir Temur ko'chasi, 108-uy. Tel.: (99871)238-64-43, e-mail: tuit@tuit.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent axborot texnologiyalari universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100084, Toshkent shahri, Amir Temur ko'chasi, 108-uy. Tel.: (99871)238-64-43).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil « ____ » _____ da tarqatildi.

(2024 yil « ____ » _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).



M.M. Musayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,
texnika fanlar doktori, professor

E.Sh. Nazirova
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi, t.f.d., professor

F.M. Nuraliyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi
texnika fanlari doktori, professor

KIRISH (fan doktori dissertatsiyasi annotatsiyasi (DSc))

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda turbulentlik nazariyasining dolzarb muammolariga, kimyoviy reaksiyalar mavjud bo'lgan turbulent oqimlar va gaz aralashmalarining samarali yonishiga katta e'tibor berilmoqda. Bunday muammolarga qiziqish kimyoviy va lazer texnologiyalari, aviatsiya, atom energetikasi ehtiyojlari, turli xil yonish moslamalari va kameralarini yaratish kabi texnik qurilmalar sonining ko'payishi hamda atrof-muhitga zaharli gaz aralashmalari chiqindilarini chiqarish bilan bog'liq. Shu bilan birga, reaksiyaga kirmaydigan va reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmalarining nafaqat uch o'lchamli, balki ikki o'lchovli turbulent struya oqimlarini ham yetarli darajada modellashtirish muammosi mexanika va amaliy fizikada bugungi kungacha eng qiyin muammolardan biri bo'lib qolmoqda. Qaralayotgan muammoning murakkabligi, bir tomondan, turbulentlik nazariyasining to'liq emasligi bilan, ikkinchidan, o'ta murakkab tabiatidan iborat bo'lgan kimyoviy reaksiyalar mavjud bo'lgan turbulent oqimlarning o'ziga xos xususiyatlari bilan bog'liq.

Hozirgi kunda jahonning yetakchi olimlari tomonidan ichki va fazoviy erkin turbulent oqimlarni, shuningdek, gaz aralashmalarini yonish jarayonlarini o'rganish uchun matematik modellar, samarali hisoblash usullari, hisoblash algoritmlari va dasturiy ta'minotni takomillashtirishga qaratilgan ilmiy-amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda.

Respublikamiz olimlari fundamental fanlarning ilmiy-amaliy qo'llanilishiga ega bo'lgan dolzarb yo'nalishlariga, xususan, nazariy tadqiq etishning ajralmas samarali usuli bo'lgan modellashtirish bilan kimyoviy reaksiyaga kirishuvchi muhitlar dinamikasini o'rganishga alohida e'tibor qaratmoqda. Ular, ayniqsa, Yangi O'zbekistonning shakllanish jarayonida, sanoatni modernizatsiya qilish orqali chiqindisiz texnika va texnologiyalarni ishlab chiqish va tatbiq etish, ayniqsa, tabiiy gazni tejamkorlik bilan yoqish imkonini beruvchi texnik qurilmalarni yaratish bo'yicha ishtiyoq bilan ilmiy tadqiqot ishlarini olib borishmoqda.

Aniq va samarali matematik modellarni yaratish hamda ularni echish uchun metodlar, algoritmlar va dasturlarni ishlab chiqish ikki va uch o'lchovli turbulent oqimlarda issiqlik va massaalmashuvi jarayonlarini tadqiqot qilish uchun muhim vazifalar bo'lib hisoblanadi.

Mazkur dissertatsiya doirasida olib borilgan tadqiqot natijalari O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli¹ "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida" gi farmoni va O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 8-noyabrdagi PQ-3379-son "Energiya resurslaridan oqilona foydalanishni ta'minlash chora-tadbirlari to'g'risida" gi Qarori hamda ushbu faoliyatga tegishli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada hamohangdir.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga bog'liqligi. Dissertatsiya ishi tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi

¹ [O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "Yangi O'zbekistonni 2022-2026-yillarda rivojlantirish strategiyasi to'g'risida" gi PF-60-son Farmoni;](#)

fan va texnologiyalarini rivojlantirishning IV. “Axborotlashtirish va axbopot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi². Matematik modellashtirish va hisoblash usullaridan foydalangan holda sonli eksperimentlar yordamida issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari muammosini o‘rganish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar dunyoning oliy o‘quv yurtlari va yirik ilmiy markazlarida, xususan: NASA va Stenford universitetida (AQSh), Moskva davlat universiteti, Sankt-Peterburg Politexnika Universiteti, TSAGI (Rossiya), Qozog‘iston Milliy universiteti (Olmaota), O‘zbekiston Milliy universiteti, O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Matematika va Inshootlar mustahamligi va mexanikasi institutlarida olib boriladi.

Hozirgi vaqtda dunyoning yetakchi olimlari gazlarning turbulentslik, turbulent oqimi va yonishi, shuningdek kimyoviy o‘zaro ta’sirsiz va ta’sirda bo‘lgan turbulent struya oqimlarni matematik modellashtirish nazariyalarini rivojlantirish ustida faol izlanish olib bormoqdalar.

Turbulent, ayniqsa, uch o‘lchamli struya oqimlarni tadqiqoti hozirgi holati Xalqaro nazariy va amaliy anjumanlarda AQSH, G‘arbiy Yevropa, Yaponiya, Qozoqiston, Rossiya va boshqa mamlakatlarning taniqli mutaxassisleri ishtirokida muntazam ravishda muhokama qilinmoqda.

Turbulentslikni modellashtirish muammolari, ichki va tashqi fazoviy turbulent oqimlarning issiqlik va massa almashinish jarayonlarini ishonchli hisoblash usullari va eksperimental tadqiqotlari xorijiy mutaxassislarning ilmiy nashrlari va monografiyalarida yoritilmoqda, xususan: B. Van den Berg (Niderlandiya), I.-D. Fagm (G‘arbiy Berlin), J. Kustei (Fransiya), Tsze Ch. Tai (AQSh), S. Soroyi va A. D. Yung (Buyuk Britaniya), I. Senoo (Yaponiya) va klassik monografiyalar: P. Roach; E. Oran va J. Boris; D. Anderson, J. Tannexill, Pletcher; K. Fletcher, Lapin Yu.V., Strelets M.X., Garbaruk A.V., Shur M.L., Loytsyanskiy L. G. va boshqa olimlar ishlarida mavjud.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Ichki va tashqi fazoviy turbulent reaksiyaga kirishuvchi oqimlarda issiqlik va massa almashinish jarayonlarini modellashtirish va sonli o‘rganish bilan bog‘liq tadqiqotlar G.N.Abramovich, N.I.Akatnov, F., Ginzburg I.P., Baev V.K., Bai Shi-i, Vulis L.A., Ershin Sh.A., Yarin L.P., Zeldovich Ya.B., Loytsyanskiy L.G., Lapin Yu.V., Strelets M.X., Pospelov V.A., Ferri A., T.D. Teylor, E. Ndefo., Prandtl L., Palatnik I.B., Temirbaev D.J. kabi ko‘plab olimlar tomonidan olib borilgan va olib borilmoqda.

Respublikamiz olimlari Aliyev F., M.M. Aripov, Jumaev Z.Sh., Xujaev I.K., N. Ravshanov, Malikov Z.M. va boshqalar ko‘p fazali va ko‘p komponentali reaksiyaga kirishuvchi muhitlarning gidroaerodinamikasi, hamda yonish muammolarini nazariy va eksperimental, shuningdek, sonli tadqiq qilish ishlarini olib bormoqdalar.

² Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi tahlili quyidagi manbalarga asosan bajarilgan: <http://www.sciencedirect.com/science/jrnallbooks/sub/mathematics>.

Ikki turbulent oqimni aralashishida resirkulyatsiya zonalarining mavjudligi shartlari va o'lchamlari nazariy va eksperimental tadqiqotlari natijalari Graya A., Cyrtet R., Barchilon, V.K.Baev va uning hamkasblarining ishlarida keltirilgan. Biroq, eksperimental tadqiqotlar va umumlashtirishlar, asosan, kanalga kirishda oqimlarning ko'ndalang kesimi maydonlarining katta nisbati holatlariga taalluqlidir.

Quvurlarda oqimlar aralashishining ba'zi parametrlari to'liq Nave-Stoks tenglamalari asosida, mualliflar V.N.Petrov, N.N.Fedorova, K.V.Fedotova, A.G.Egorov, N.E.Shishkin va boshqalar tomonidan o'rganilgan, lekin yo'ldosh oqimlarning qaysi parametrlari va quvur geometriyasida resirkulyatsiya zonasi kuzatilishi o'rganilmagan.

Uch o'lchovli, ayniqsa kimyoviy reaksiyali turbulent oqimlarni hisoblash uchun tegishli usullarni ishlab chiqish muammo, chunki uch o'lchovli turbulent oqimlar uchun qoniqarli turbulentlik modeli deyarli yo'q.

Mualliflar I.B. Palatnik, D.J.Temirboev, J.Way, P.L.Libbi, L.N.Uxanov, M.N.Shtayger, K.Kuzov, S.I.Isatayev, R.M.Sforza, A.P.Makasheva, A.J.Naymanovalar, asosan, to'g'ri to'rtburchakli soplodan oqib chiquvchi yopishqoq struya qo'shilishiga oid bir qancha tajribalar va nazariy - sonli hisoblarlarni amalga oshirganlar.

Qo'shilmagan gazlarning yonishining eng umumiy tahlilini Ya.B.Zeldovich, V.A.Shvab, A.A.Vulis, Sh.A.Eyrshin, L.P.Yarin, V.K.Baev va o'zbek olimlari, F.Aliyev, Z., Sh.Jumayev, I.K.Xujayev va boshqalar ilmiy ishlarida mavjud.

Keltirilgan ishlardagi tadqiqotlar asosan ikki o'lchovli tekis yoki o'qqa simmetrik turbulent oqimlarda aralashmagan gazlarning yonishi bilan bog'liq. To'g'ri to'rtburchakli yoki murakkab shakldagi soplodan chiqayotgan yoqilg'i gaz yoniishdagi alanga parametrlarini batafsil sonli o'rganish nashrlarda deyarli yo'q, ammo V.I.Vasilyevning hammualliflidagi ishlari va mualliflar A.A.Vulis, Sh.A.Ershin, L. P. Yarin, Markatos N. C., Moulton A., Carpenter M. H., Patankar S. V., Spalding D., G. A. Kamalova., V. E.Messerle, A.J.Naymanova, A.B.Ustimenko tadqiqotlarida fazoviy turbulent oqimlar ayrim parametrlari o'rganilgan xolos.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilayotgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Milliy universiteti ilmiy tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq, OT-F4-30 «Ikki marta noxiziqli kross sistemaning konvektiv ko'chish, o'zgaruvchan zichlik, manba yoki yutish ta'siridagi sifat xossalari tadqiq qilish» va MRU-OT-81/2017 "Ikki fazali muhitning termodinamik jihatdan izchil matematik modelini o'zaro effektlar bilan dissipativ yaqinlashuvda matematik modellashtirish" mavzularidagi ilmiy tadqiqot loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi -ichki ikki o'lchovli va uch o'lchovli reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmalarining turbulent oqimlar modellarini yaratish va nazariyasini rivojlantirish, turbulent yopishqoqlik koeffitsiyenti bo'yicha algebraik va ikki parametrli mavjud modellarini takomillashtirish va yangi turbulentlik modellarni ishlab chiqish, uch o'lchovli parabolalashgan Nave-Stoks tenglamalarini sonli echish metodlarini takomillashtirish shuningdek, gidroaerodinamika masalalarini modellashtirishdan iboratdir.

Tadqiqot vazifalari:

reaksiyaga kirishuvchi gazlarning turbulent oqimlarining ichki va tashqi fazoviy muammolarini o'rganish uchun ularni modellashtirish va uni echish hisoblash usullarini, algoritmlarini va dasturiy ta'minotlarini ishlab chiqish;

kesimi o'zgarmas va o'zgaruvchan quvurlarda yo'ldosh struya oqimlarni aralashishi va tarqalish jarayonlarini o'rganish;

aralashuvchi oqimlarining boshlang'ich parametrlari nisbati va quvur geometriyasi o'chovlarini qanday qiymatlarida resirkulyatsiya zonalari paydo bo'lishi mumkinligini o'rganish;

to'g'ri to'rtburchak soplodan chiqayotgan izotermik va izotermik bo'lmagan, hamda reaksiyaga kirishuvchi gazlarning oqim boshlang'ich qismini o'rganish;

fazoviy reaksiyaga kirishuvchi turbulent struya oqimlar uchun algebraik turbulentlik modelini takomillashtirish;

fazoviy turbulent struya oqimlar uchun kop parametrli turbulentlik modelini takomillashtirish;

yoqilg'i va oksidlovchi gaz boshlang'ich qiymatlari, tezligi, harorati, konsentratsiyasi, turbulentlikning kinetik energiyasi va to'g'ri to'rtburchakli soplo tomonlar nisbatini alanga parametrlariga ta'sirini o'rganish;

olingan sonli yechimlarni tajriba ma'lumotlari va boshqa ma'lum yechimlar bilan solishtirish yo'li bilan moslik darajasini aniqlash.

Tadqiqotning obyekti. Tadqiqot obyekti, kesimi o'zgarmas va o'zgaruvchi quvurlarda koaksial turbulent oqimlar, shuningdek uch o'lchovli reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmalari va diffuziyon alangan iborat.

Tadqiqotning predmeti - ikki o'lchovli yopishqoq gaz ychun to'liq Nave-Stoks va ko'p komponentli reaksiyaga kirishuvchi gaz uchun uch o'lchovli parabolalashgan Nave-Stoks tenglamalaridir.

Tadqiqot usullari. Mazkur dissertatsiyada ikki o'lchovli nostatsionar to'liq va uch o'lchovli parabolalashgan Nave-Stoks tenglamalari sistemasini sonli yechish usullari qo'llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

kesimi o'zgarmas va o'zgaruvchi quvurda koaksial turbulent oqimlarni aralashishi va tarqalishini jarayoni matematik modeli qurilgan va sonli eychilgan;

to'liq Nave-Stoks tenglamalari sistemasini konservativ shaklini saqlab qolish imkonini beradigan va hisoblash ishlarini samarasini oshirish uchun, fizik parametrlarni va koordinatalarni o'lchovsizlikka keltiradigan, qaralayotgan sohani birlik kbadrat sohaga o'kazadigan hamda gaz-dinamik parametrlarning katta gradiyentlari bo'lgan oqim hududida hisoblash nuqtalarini quyushtiradigan matematik almashtirishlar ko'rsatilgan;

to'g'ri to'rtburchakli soplodan oqib chiqadigan reaksiyaga kirishuvchi aralashmagan gazlarning uch o'lchamli turbulent yonish jarayoni matematik modeli qurilgan va sonli yechilgan;

izotermik, izotermik bo'lmagan, shuningdek reaksiyaga kirishuvchi uch o'lchovli struya gaz aralashmalarining turbulent yopishqoqlik koeffitsiyentini hisoblas uchun algebraik turbulentlik modellari taklif qilingan;

reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmalarining uch o'lchovli turbulent oqimlarini hisoblash uchun turbulent yopishqoqlik koeffitsiyenti uchun ikki parametrlilik $k - \varepsilon$ modeliga kiritilgan empirik konstantalarning qiymatlari aniqlangan;

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ikki o'lchovli statsionar bo'lmagan to'liq Nave-Stoks tenglamalari uchun chekli ayirmali sxemalar va algoritmlar qurilgan, hamda ichki oqimlarni o'rganishda qo'llanilgan;

uch o'lchovli parabolalashgan Nave-Stoks tenglamalari uchun chekli ayirmali sxemalar va algoritmlar qurilgan, hamda ular tadbiqida aralashmagan gazlar diffuzion yonishda issiqlik va massa almashish jarayonini tadqiqot qilishda qo'llanilgan;

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi masala qo'yilishining qat'iyligi va mexanikaning fundamental asosiy qonunlarini qo'llanilishi, shuningdek, olingan ba'zi natijalarni ma'lum yechimlar va boshqa mualliflarning eksperimental ma'lumotlari bilan taqqoslash orqali ta'minlangan hamda tegishli xulosa va takliflarning mutasadi tashkilotlar tomonidan amaliyotga joriy etilgani bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati taklif qilingan sonli hisoblash usullari, samarali algoritmlari, takomillashtirilgan turbulentlik modellari ichki, tashqi turbulent struya oqimlar va yonish nazariyasini rivojlantirishga xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati taklif etilgan usullar va algoritmlar asosida ishlab chiqilgan dasturiy ta'minot yordamida ichki oqimlarni yanada aniqroq tadqiqot qilishda, samarali yoqilg'i pechlarini va raketa-kosmik texnikalarini loyihalashda, yoqilg'i tabiiy gazlarni tejab yoqishda, binolarni toza havo bilan ta'minlashda va atrof-muhitga zararli gaz chiqindilarini tarqatish kabi ekologik muammolarni yechishda bevosita qo'llanishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Quvurlarda turbulent oqimlarni qo'shilishi va tarqalishi hamda fazoviy diffusion yonish jarayonlarini tadqiq qilish uchun takomillashtirilgan matematik modellar, usullar, algoritmlar va dasturlardan foydalanish natijasida quyidagi natijalarga erishilgan:

sonli o'rganish natijalari Buxoroenergomarkaz aksiyadorlik jamiyati ob'yektlariga joriy qilingan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024- yil 13 - iyundagi 3/17-4/4-3678-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, yonish qozoniga uzatiladigan yoqilg'i gaz tezligi (sarfi) va havo miqdorini talab darajasida berish tavsiyasi gazning to'liq yonishi va alangada yetarli darajadagi haroratga ega bo'lishi ta'minlangan va gaz sarfini 0.9-2% gacha qisqartirgan;

gazlarning quvurda qo'shilishi va tarqalishi jarayonlarini nazariy o'rganilgan natijalari Kogon magistral gaz quvurlari boshqarmasi faoliyatiga joriy qilingan. Natijada, atrof muhitga gaz chiqindilarini tarqatishni 10-12% ga qisqartirishga erishilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024 - yil 13 - iyundagi 3/17-4/4-3678-sonli ma'lumotnomasi);

tabiiy gazning to'liq yonishiga doir tadqiqot natijalari «Kogon isitgich moslamalar» MCHJ ob'yektlariga joriy qilingan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024 - yil 13 - iyundagi 3/17-4/4-3678-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, yoqilg'i gazning to'liq yonishi uchun havoning zaruriy miqdoridan 4-8 % ko'proq berilganda, yoqilg'i sarfi 3-4% gacha kamaygan va tavsiya qilingan sopllo geometrik o'chamlari yoqilg'i sarfini 4% gacha qisqartirishga olib kelgan;

ishlab chiqilgan usul va algoritmlar “Anomal diffuziyaning differensial matematik modellari uchun sonli algoritmlarni ishlab chiqish” loyihasi bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlarini bajarishda joriy qilingan (Xoja Ahmad Yassaviy nomidagi Xalqaro Qozoq-Turk Universiteti, 2024 yil 14-fevraldagi, 04/550 - sonli ma'lumotnomasi). Natijasida, elliptik tenglama va aralash parabolik-giperbolik tip uchun noma'lum manbani aniqlashning teskari masalalarini echishning samarali algoritmi tuzilgan;

F2-FA-0-83921/F2-FA-F0383 “O'ta o'tkazgichlar va magnit materiallarda kuchli korrelyatsiya o'zaro ta'sirlar va ularning kritik parametrlarini hisoblash” fundamental grantini bajarishda xususiy hosilali differentsial tenglamalarni sonli yechish usullari o'ta o'tkazgichlarning magnit material bilan o'zaro ta'siri kritik parametrlarini hisoblashda qo'llanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi, 2024-yil 22-fevraldagi 02/14-542-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, o'ta o'tkazuvchanlik jarayonida muhitda energiyaning juda kam tarqalishi va kristallga qo'llaniladigan magnitlanish jarayonlariga mexanik kuchlanish ta'sirining muhimligi aniqlangan;

Nazariy va amaliy natijalar F-4-32 “Сингуляр коэффициентли Геллерстедт тенгламаси учун Трикоми, силжишли ва Бицадзе-Самарский масалалари шартлари бирлаштирилган масалаларнинг корректлигини ўрганиш” fundamental grantini amalga oshirishda joriy qilindi (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi, 2024-yil 22-fevraldagi 02/14-542-sonli guvohnoma). Natijada, aralash tipdagi tenglamalar va Gellershtedt tenglamasi uchun chegaraviy masalalarning sonli yechimlari olingan;

ko'p komponentli reaksiyaga kirishuvchi gazning oqim jarayonini tavsiflovchi uch o'lchovli parabolizatsiyalangan Nave-Stoks tenglamalarini sonli echishning ishlab chiqilgan usullaridan chegaraviy masalalarni echish mavzusidagi ma'ruzalar, amaliy va laboratoriya mashg'ulotlarida joriy qilingan (Qirg'iziston Respublikasi Ta'lim va fan vazirligining O'sh texnologiya universitetining 2023- yil 26-dekabrda 09.08/365-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, “Axborot tizimlari va texnologiyalari” yo'nalishi talabalari kimyoviy reaksiyaga kirishuvchi fazoviy oqimlarni modellashtirish va ularni sonli yechishni o'zlashtirgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 30 ta ilmiy-amaliy anjumanlarda, jumladan, 9 ta respublika va 21 ta xalqaro konferensiyalarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 60 ta ilmiy maqola chop etilgan. Shundan 30 ta ilmiy maqola, jumladan, 11 ta xorijiy (7 tasi Scopus xalqaro bazaga kiritilgan jurnallarda) va O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini

analitik almashtirishlar bilan Nave-Stoks tenglamalarini yechish metodi va algoritmi ham keltirilgan, shular qatori ishlab chiqilgan metod va hisoblash algoritmi hamda dasturiy ta'minot samaradorligiga va natijalarning haqqoniyligiga doir izlanishlar keltirilgan.

(1) va (2) o'zgarishlarga muvofiq, o'lchovsiz Nave-Stoks tenglamalari sistemasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho v + \Omega \rho u) = 0, \\
& \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho u + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y (\rho u^2 + P) + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho u v + \Omega (\rho u^2 + p)) = \\
& = \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{4}{3} f F_y \varphi_x^{-1} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(\frac{4}{3} \Omega \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\
& + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \Omega \right) + \frac{\partial}{Re\partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left(\left(\frac{4}{3} \Omega^2 + 1 \right) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{3} \Omega \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (3) \\
& \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho v + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y \rho u v + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho v^2 + p + \Omega \rho u v) = \\
& = \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} f \varphi_x^{-1} F_y \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \Omega \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\
& + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(-\frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} + \Omega \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\
& + \frac{\partial}{Re\partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left[\left(\Omega^2 + \frac{4}{3} \right) \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{3} \Omega \frac{\partial u}{\partial y} \right]. \\
& \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x E + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y (E + p) u + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x ((E + p) v + \Omega (E + p) u) = \\
& = \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} f \varphi_x^{-1} F_y \mu \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{c_p}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\
& + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} u \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{4}{3} \Omega u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{c_p}{Pr_T} \Omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\
& + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} v \frac{\partial u}{\partial x} + \Omega v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} \Omega u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{c_p}{Pr_T} \Omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\
& + \frac{\partial}{Re\partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left[\left(\Omega^2 + \frac{4}{3} \right) v \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{4}{3} \Omega^2 + 1 \right) u \frac{\partial u}{\partial y} + (\Omega^2 + 1) \frac{c_p}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial y} + \right. \\
& \left. + \frac{1}{3} \Omega \left(u \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right],
\end{aligned}$$

$$E = \rho C_v T + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2), \quad p = \rho T.$$

Yuqoridagi tengliklarda L – quvur uzunligi, f – guvur formasi; $\Omega = -\eta f' / f$, K_x, K_y – quyushtirish parametrlari, qolganlari umum qabul qilingan belgilashlar.

Turbulent yopishqoqlikni nisoblash uchun ushbu formula qo'llanilgan:

$$\mu = \text{const} T^{0,6472} + \varepsilon \rho b^2(x) \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|; \quad (4)$$

bu yerda ε - empirik turbulentlik doimiysi; $b(x)$ – siljish maydonining shartli yarim kengligi.

Chegaraviy va boshlang'ich shartlarni shakllantirish. Chegaraviy shartlarni qo'yishda quvur yassi va simmetrik deb faraz qilinadi (1-rasm). Bunday holda, oqimni simmetriya o'qi va quvur bitta devori orasidagi mintaqadagi oqimni

o'rganish bilan cheklanish mumkin. Berilgan (3) tenglamalar sistemasi va (4) munosabat quyidagi o'lchamsiz boshlang'ich va chegaraviy shartlar yordamida yechilishi mumkin:

$$\begin{aligned}
 & t = t_0: \\
 & \begin{cases} u = 1, v = 0, E = E_2, \mu = \mu_2, \rho = 1, p = p_2 : 0 \leq y \leq R_1, \\ u = u_1, v = 0, E = E_1, \mu = \mu_1, \rho = \rho_1, p = p_1 : R_1 < y < 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_\omega, \mu = \mu_\omega : y = f_\omega = 1; \end{cases} \quad (5) \\
 & 0 < x < 1: \begin{cases} u = 0, v = 0, E = E_0, \rho = \rho_0, p = p_0, \mu = \mu_0 : 0 < y < f_\omega = 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_\omega, \mu = \mu_\omega : y = 1; \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & t > t_0: \\
 & x = 0: \begin{cases} u = 1, v = 0, E = E_2, \mu = \mu_2, \rho = 1, p = p_2 : 0 \leq y \leq R_1, \\ u = u_1, v = 0, E = E_1, \mu = \mu_1, \rho = \rho_1, p = p_1 : R_1 < y < 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_1, \mu = \mu_\omega : y = 1; \end{cases} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$0 < x \leq 1: \left\{ \begin{array}{l} u = 0, v = 0, E = \tilde{E}_\omega, \\ \rho = \tilde{\rho}_\omega, \frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = 0, \mu = \tilde{\mu}_\omega, T = \tilde{T}_\omega, \text{yoki } \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0; \end{array} \right\} y = 1, \quad (7)$$

$$\left. \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} = v = \frac{\partial E}{\partial y} = 0. \right\} \right\} y = 0. \quad (8)$$

$$x = L: \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \text{ yoki } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0 \right\} 0 < y < 1. \quad (9)$$

Bu yerda $\rho_1, E_1, \hat{\mu}_1$ va $\rho_2, E_2, \hat{\mu}_2$ mos ravishda berilgan struyalar temperaturalari T_1, T_2 va bosimlari p_1, p_2 orqali hisoblanadi (indeks 2 asosiy struyaga, indeks 1 yo'ldosh struyaga tegishlilikni bildiradi). $\rho_\omega, E_\omega, \tilde{\rho}_\omega, \tilde{E}_\omega, \tilde{\mu}_\omega$ qiymatlari u, v, T, P larning quvur devoridagi chegara shartlari orqali hisoblanadi, u_0, E_0, ρ_0, μ_0 , mos o'zgaruvchilarning biror boshlang'ich qiymatlari.

Barcha variantlarda devorda P bo'yicha $\partial P / \partial \vec{n} = 0$ shart qo'yildi, bunda P ning o'zgarishligi butun chegara qatlami bo'ylab emas, balki faqat devorgacha Δy qadamgacha qalinlikda o'rinli deb qaraladi.

Nave-Stoks (3)-(4) tenglamalarini (5)-(9) boshlang'ich va chegara shartlari bilan sonli yechish uchun (3) differensial tenglamalar sistemasini vektor-konservativ shaklda yozamiz

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = \frac{\partial V_1(U, U_x)}{\partial x} + \frac{\partial V_2(U, U_y)}{\partial x} + \frac{\partial W_1(U, U_x)}{\partial y} + \frac{\partial W_2(U, U_y)}{\partial y}, \quad (10)$$

bu yerda $U = [\varphi_x F_y f \rho, \varphi_x F_y f \rho u, \varphi_x F_y f \rho v, \varphi_x F_y f E]$ – vektor konservativ o'zgaruvchilar va F, G, V_1, V_2, W_1, W_2 -oqim vektorlari.

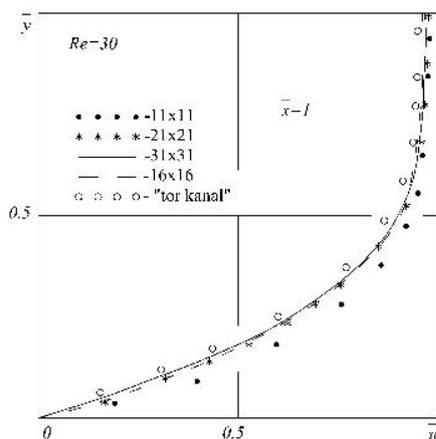
(10) tenglamadan $\partial U / \partial t$ topiladi va vaqt hosilasi uchun ushbu universal chekli ayirma formulasidan foydalaniladi

$$\Delta U^n = \frac{\theta \Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial t} \Delta U^n + \frac{\Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial t} U^n + \frac{\theta_2}{1 + \theta_2} \Delta U^{n-1} + 0 \left[\left(\theta - \frac{1}{2} - \theta_2 \right) \Delta t^2 + \Delta t^3 \right], \quad (11)$$

bu yerda $\Delta U^n = U^{n+1} - U^n$.

Bu formulaning imkoniyatlari va yozuv shakli θ_2, θ parametrlarning qiymatlarini tanlashga bog'liq. Agar $\theta_2 = 0.5$ va $\theta=1$ bo'lsa, sxema $O(\Delta t^3)$ aniqlik bilan olingan oshkormas uch nuqtali orqaga approksimatsiyali bo'ladi.

Differensial tenglamalar sistemasini sonli yechish uchun oshkormas faktorlangan Beam-Warming ayirmali sxemasidan foydalanamiz. Sxema konservativ o'zgaruvchilar va oqimlarning o'sishlari (farqli o'zgarishi) ko'rinishida qurilgan bo'lib, bu sxemaning sodda yozuvini ta'minlaydi va samarali hisoblash algoritmiga olib keladi. Algoritm vaqt bo'yicha ikkinchi tartibli aniqlikka ega bo'lib, faktorizatsiyalangan va iteratsiyani talab qilmaydi, hamda uch qatlamli bo'lgani bilan, u faqat ikkita vaqt qatlamida ma'lumotlarni saqlashni talab qiladi xolos.



2-rasm. Ikkala koordinatalar hisoblas nuqtalar sonini o'zgarishidagi bo'ylanma tezlik profili

2-rasmda N_x va N_y (mos ravishda Ox va Oy o'qi bo'icha nuqtalar soni) nuqtalar soni 11×11 , 21×21 , 31×31 , 31×41 qadam o'zgarmas va 16×16 ($K_x = -0,4727$, $K_y = 2,6045$) o'zgaruvchi, hamda 31×41 to'rda, lekin "tor kanal" modeli yordamida olingan quvur chiqish qicmidagi bo'ylanma tezlik profili keltirilgan. Olingan natijalar o'rtasidagi yaxshi kelishuv, hisoblashlarni kam sonli nuqtalarda, lekin hisoblashlarda quyuqlashtirish funksiyalarini qo'llab hisoblash, hisoblash vaqtini tejash va aniq natija olish imkonini beradi. Uslubiy masalalardan yana biri, Kurant soni (c) o'zgarish imkoniyati va uning yechimning yaqinlashishiga ta'siri bilan bog'liq edi. Kurant sonining keng oraliqda o'zgarishida uncha katta bo'lmagan Reynolds sonlarida kesimi o'zgarmas quvur uchun vaqt bo'yicha iteratsiya soni 100 tadan va kesimi o'zgaruvchi uchun 170 tadan oshmadi. Uchinchi bob "**Kesimi o'zgarmas va o'zgaruvchi yassi quvurda ikki oqimning aralashishini parametrik o'rganish**" deb nomlangan. Ushbu bobda ishlab chiqilgan metod va yechish algoritmi asosida tuzilgan dastur yordamida koaksial quvulardan kesimi o'zgarmas va o'zgaruvchi quvurga kiradigan turbulent havo struyalarni har xil boshlang'ich qiymatlari nisbatida struyalarning qo'shilishi va tarqalishi o'rganilgan(1-rasm).

Asosiy tadqiqot obyekti sifatida Baev V.K., Bakaldina L.A., Sidorov I.V. ishlaridagidek, ushbu geometrik xususiyatlarga ega quvur tanlandi: $D = 188$ mm ($f_0 = 94$ mm - yarim balandlik), $L = 1,4$ m ($L = 0,5$ m). Xususan, ushbu parametrlar

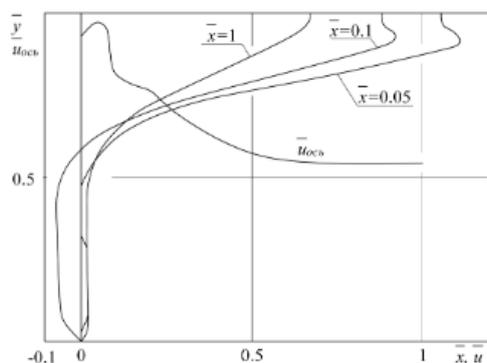
nisbati- tezlik ($\varphi_1 = u_2 / u_1$), kirish o'lchamlari ($\varphi_2 = R_1 / f_0$), geometrik o'lchamlar ($\varphi_3 = L / f_0$), temperatura ($\varphi_4 = T_2 / T_1$) va bosim ($\varphi_5 = P_2 / P_1$), struyalarni qo'shilishi va tarqalishiga ta'siri o'rganilgan.

§3.1 da struyalar tezliklari va ularning geometriyalari nisbatini teng temperaturalarda ($\varphi_4 = T_2 / T_1, T_2 = 300 K, T_1 = 300 K$) va bosimlarda ($\varphi_5 = P_2 / P_1, P_2 = 1 \text{ atm}, P_1 = 1 \text{ atm}$) oqim rivojiga ta'siri o'rganilgan.

Sonli natijalar shuni ko'rsatdiki, yetarlicha katta φ_1 ($\varphi_1 = 45,072, u_2 = 311 \text{ m/s}, u_1 = 6.9 \text{ m/s}$) va kichik ($\varphi_1 = 0.022, u_2 = 6,9 \text{ m/s}, u_1 = 311 \text{ m/s}$) da, kanalning kirish kesimining 25% ni egallagan oqim resirkulyatsiya zonasining shakllanishi kuzatiladi.

§3.2 da kesimi o'zgarmas quvurda izotermik bo'lmagan oqimlarning aralashishi va tarqalish jarayoniga ta'siri ushbu variantlarda $0,428 < \varphi_4 < 2,333, \varphi_5 = 1, \varphi_4 = 0,428; T_2 = 300 K, T_1 = 700 K$ da va $\varphi_4 = 2,333; T_2 = 700 K, T_1 = 300 K$ da organilgan. Kichik $\varphi_1, \varphi_2 = 0,26$ va $\varphi_2 = 0,5$ ($\varphi_4 = 2,333$) aralashish hududida tezlik va temperatura profilida keskin o'zgarish kuzatilmaydi. Tezlik φ_1 va temperatura φ_4 larning katta nisbatlarida ($\varphi_1 = 72,464; u_2 = 500 \text{ m/s}, u_1 = 6.9 \text{ m/s}; \varphi_2 = 0,26; \varphi_3 = 14,894; \varphi_4 = 2,333$) kirish bosh qismining taxminan 55% ni egallaydi va quvur bo'ylab 20 sm ga yetadi (3-rasm), bu V.K.Baev, L.A.Bakaldin, V.A.Konstantinovskiy, I.V.Sidorovlar ishlarining eksperimental ma'lumotlari bilan tasdiqlangan.

§3.3 da struya bosimlari har xil bo'lganda ($1 < \varphi_5 \leq 4$), temperaturaning ($0,428 < \varphi_4 < 2,333$), tezlikning ($0,022 < \varphi_1 < 72,464$) va soplolarning kirish o'lchamlarining ($\varphi_2 = 0,26$ va $\varphi_2 = 0,5$) nisbatida struyalarning qo'shilish va tarqalishi xususiyatlariga ta'sirini o'rganishga bag'ishlangan.



3-rasm. Quvurning turli kesimlardagi va o'q bo'icha bo'ylama tezlik profilari o'zgarishi: $\varphi_1 = 72,4638; \varphi_2 = 0,26; \varphi_3 = 5,3191; \varphi_4 = 2,33; \varphi_5 = 1$

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, struyaning temperaturasi va bosimining oshishi, quvurning dastlabki qismlarida resirkulyatsiya oqimi paydo bo'lishiga va quvurning bosh qismida oqimning tez rivojlanishiga, shuningdek o'qda bo'ylanma tezlikni keskin oshishiga olib keladi va kirish qismidan uzoqlashishi bilan uning tez pasayishi kuzatiladi.

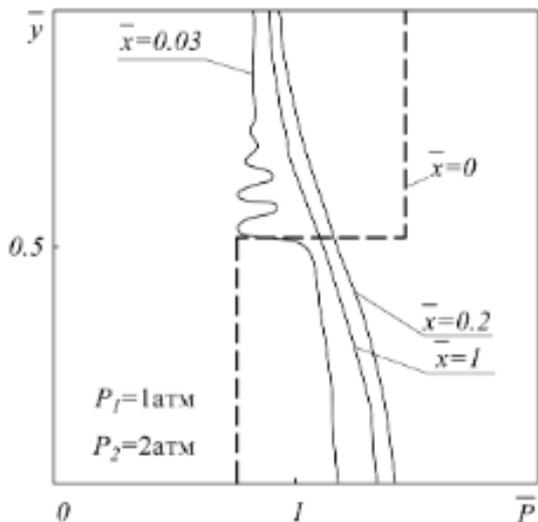
Teskari oqimlar kuzatiladigan boshlang'ich sohalarda ($\varphi_1 = 45.072; \varphi_2 = 0.5; \varphi_4 = 1,666; T_2 = 500 K, T_1 = 300 K; \varphi_5 = 2$), ko'ndalang bosim o'zgarishi garmonik bo'lishi kuzatiladi (4-rasm).

§3.4 va 3.5 larda yassi tirqishlardan (koakcsal soplolardan) chiqayotgan turbulent havo oqimrini kengayuvchi quvurda tarqalishi o'rganildi.

Tadqiqotlar yo'ldosh struyalarning tezliklari nisbati $1,4705 \leq \varphi_1 \leq 71,428$ ($\varphi_1 = 1,4705: u_2 = 500 \text{ m/s}, u_1 = 340 \text{ m/s}$ va $\varphi_1 = 71,428: u_2 = 500 \text{ m/s}, u_1 = 7 \text{ m/s}$); kirish o'lchamlari $0.26 \leq \varphi_2 \leq 0,5$; temperaturalari $1 \leq \varphi_4 \leq 2,333$;

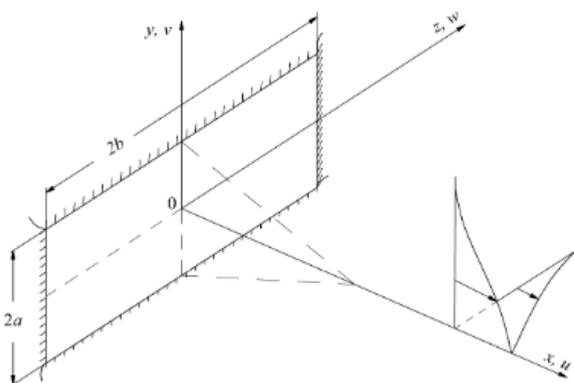
bosimlari $1 \leq \varphi_5 \leq 2$ nisbatlarida va shuningdek quvur kengayish burchaklari $0 < \gamma \leq 11^\circ$ da o'tkazildi.

Tadqiqotdan ma'lum bo'ldiki, teng temperaturalarda ($\varphi_4 = 1$) va bosimlarda ($\varphi_5 = 1$), $\gamma = 6^\circ$ va $\gamma = 11^\circ$ bo'lganda, teskari oqim zonalarini kuzatilmaydi, bo'ylanma tezlik va temperatura quvur ko'ndalang kesimi bo'ylab silliq o'zgaradi.



4-rasm. Kanalning kirish qismidan turli masofalardagi ko'ndalang kesimlarda bosim taqsimoti: $\varphi_1=45.0725$; $\varphi_2=0.5$; $\varphi_3=14.8936$; $\varphi_4=1.666$; $\varphi_5=2$

allmashtirishlar. Masala qo'yilishi va yechish metodi» deb nomlanadi va shu masalalar yoritilgan.



5-rasm. To'g'ri to'rtburchakli coplodan tarqalayotgan struya tasviri

ko'ndalang kesimi bo'ylab uzluksiz ravishda o'zgarib turadigan \tilde{C} konsentratsiya funksiyasini kiritish orqali komponentlarning massa konsentratsiyasi tenglamalarini sonini kamaytirish usuli ko'rsatilgan, bu esa to'rt komponentli aralashma uchun manbaali tenglamalardan manbaasiz bitta tenglamaga keltirish

§3.5 da bosimlar har xil bo'lganda, yo'ldosh struyalar temperaturalari, tezliklari nisbatlari va koaksiyal soplolarning geometrik o'lchamlari nisbatlarini kengayuvchan quvurda aralashishi va tarqalishiga ta'sirini o'rganishga bag'ishlangan.

Struya bosimlari har xil ($\varphi_5 = 2$), quvur kengayish burchagi $\gamma = 6^\circ$ bo'lganda, tovush tezligigacha va unga yaqin oqim tezliklarida ($\varphi_1 = 45,072$) va temperaturalarning katta nisbatida ($\varphi_4 = 2,333$), quvurning dastlabki qismi devoriga yaqin hududida resirkulyatsiya zonasi kuzatiladi.

To'rtinchi bob **“Reaksiyaga kiruvchi gazlarning uch o'lchamli turbulent struya nazariyasining asosiy tenglamalari va ularda**

§4.1 da to'g'ri burchakli soplodan (5-rasm) oqib chiqadigan reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmasining yo'ldosh struya havoga (oksidlovchi) tarqalishining uch o'lchovli turbulent struya oqimlarini ifodalovchi matematik modeli ba uni amalga oshirish uchun muhim bo'lgan chegaraviy va boshlang'ich shartlar keltirilgan.

§4.2 da propan-butan aralashmasining havoda diffuzion yonishi modeli va uning uch o'lchovli turbulent struya oqimlari uchun amalga oshirilishi ko'rsatilgan. Struya oqimi

imkonini beradi. \tilde{C} funktsiyasi soplning yoqilg'i qismida 1 ga, havo zonasida esa 0 ga teng qiymatni oladi.

§4.3 da masalani sonli yechish uchun dastlabki tenglamalar sistemasini va chegaraviy shartlarni o'lchovsiz holga va ushbu $y=\bar{y}/L$ ($L=a/b$, \bar{y} – o'lchovsiz koordinata) almashtirishlar yordamida chiqish kesimini kvadratga keltirish ko'rsatilgan. Shundan so'ng tenglamalar sistemasini quyidagicha ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \\ & \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ & \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{L \partial y} + \frac{4}{3L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{L \partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ & \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & \quad + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ & \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial H}{\partial y} + \rho w \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{L^2} \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q_{dis}, \\ & \rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} = \frac{1}{L^2 Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

bunda

$$\begin{aligned} Q_{dis} = & \left(1 - \frac{1}{Pr_T} \right) \left\{ \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} + \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{Pr_T} \right) \left\{ \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \\ & - \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2}{3} \mu v \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu v \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2}{3} \mu w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{2}{3} \mu w \frac{\partial v}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

$$P = \rho T \sum_{i=1}^{N_K} \frac{C_i}{m_i}, \quad H = C_p T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \sum_{i=1}^{N_K} C_i h_i^*,$$

$$\mu = \mu_n + \alpha \rho (b^2(Ly) + b^2(z)) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y} \right)^2} \left(\frac{T}{T_2} \right)^\alpha. \quad (13)$$

Chegaraviy shartlarni qo'yishda struyani OX o'qi bo'yicha markaziy simmetryaga ega deb qaraladi, bu esa, to'g'ri to'rtburchakning choragini qarash imkonini beradi va integrallash sohani ikki tomoni simmetriya tekisliklaridan iborat bo'ladi. Yuqoridagi farazlarga asoslangan o'lchovsiz chegaraviy shartlar ushbu ko'rinishda qo'ilgan.

$$x = 0:$$

$$0 \leq y \leq 1, \quad 0 \leq z \leq 1:$$

$$u = 1, v = 0, w = 0, H = H_2, P = P_2, \tilde{C} = 1, \mu = \mu_2 (k = \bar{k}_2, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_2);$$

$$1 < y < y_{+\infty}, \quad 1 < z < z_{+\infty}:$$

$$u = u_1, v = 0, w = 0, H = H_1, P = P_1, \mu = \mu_1, \tilde{C} = 0 (k = \bar{k}_1, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_1);$$

$x > 0$:

$$z = 0 < y < y_{+\infty}: \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial H}{\partial z} = 0, \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \right);$$

$$y = 0, 0 < z < z_{+\infty}: \frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \right);$$

$z = 0, y = 0$:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} = \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} = v = w = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial z} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \right); \quad (14)$$

$$z \rightarrow z_{+\infty}, \quad y \rightarrow y_{+\infty}: u = u_1, v = 0, w = 0, H = H_1, P = P_1, \tilde{C} = 0$$

$(k = \bar{k}_1, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_1).$

Bu yerda “2” indeksi parametrlar asosiy (yonuvchi) oqimga va “1” yo‘ldosh oksidlochi oqimga tegishli ekanligini ko‘rsatadi, N_y va N_z - y va z , o‘qi bo‘ylab nuqtalar soni, h_i^* - i-komponentning issiqlik shakllanishi va qolgan barcha belgilar odatda qabul qilinganlar.

§4.4 da reaksiyaga kirishuvchi gazlarning uch o‘lchovli izobarik turbulent oqimlarini hisoblash uchun yaratilgan metod va algoritmi bayon qilingan.

Asosiy differentsial tenglamalar approksimasiyasi Ox o‘qi bo‘ylab oshkormas ikki qatlamli o‘n nuqtali o‘zgaruvchan yo‘nalishlar tipidagi sxema va differensiallar $O(\Delta x, \Delta y^2, \Delta z^2)$ tartibli ayirma analoglari bilan almashtirish bilan amalga oshirilgan.

Sistemadagi harakat tenglamalari, energiya va konsentratsiya tenglamasining tipi parabolik bo‘lib, u, v, w, H, \tilde{C} , ni aniqlash uchun x, z, y o‘qlari yo‘nalishlariga ko‘ra yurish(ilgari) protsedurasi yordamida yechimni topish mumkin, keyin konsentratsiyaning alohida komponentlarini C_i hisoblab chiqiladi va $H = C_p T + \frac{u^2+v^2+w^2}{2} + \sum_{i=1}^{N_K} C_i h_i^*$ munosabatdan T ni, va holat tenglamasidan- zichlik ρ topiladi.

Uzluksizlik tenglamasini qondirish uchun tezlik vektori koordinatalarini, harakat tenglamalaridan topilgan (u_p, v_p, w_p) oraliq yechim va plyus topilishi kerak bo‘lgan (u_c, v_c, w_c) tuzatish(qo‘shimcha) qiymatlari quyidagi ko‘rinishda olinadi.

$$u = u_p + u_c, \quad v = v_p + v_c, \quad w = w_p + w_c. \quad (15)$$

Qo‘shimcha tezliklar tain zichlik ρ bilan Φ funktsiyaning potensial gradient kabi olinsa:

$$\rho u_c = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \rho v_c = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad \rho w_c = \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (16)$$

u holda uzluksizlik tenglamasidan Puasson tenglamasiga kelamiz

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = Q_p \quad (17)$$

Qo‘shimcha tezliklarni (16) ko‘ndalang tekislikda (17) ayirma tenglamasini yechish natijasida olingan Φ taqsimotidan hisoblash mumkin (Q_p -aniq manba). Paragrafning oxirida hisoblash algoritmi batafsil keltirilgan.

§4.5 da issiqlik va massa almashinuvi jarayonida bosimning o‘zgarishini hisobga olgan holda reaksiyaga kirishuvchi gazlarning uch o‘lchovli turbulent oqimlarini hisoblash usuli va algoritmi keltirilgan. To‘g‘ri bosim taqsimotini topish uchun harakat va uzluksizlik tenglamalaridan foydalanish usuli ko‘rsatilgan.

YOZ tekisligida (12) tenglamalar sistemasini chekli ayirma metodi yordamida skalyar haydash (progonka) usulinini qo‘llab ketma-ket yechish orqali harakat

tenglamalaridan u_p, v_p, w_p oraliq yechimlar topiladi. Haqiqiy u, v, w va P yechimlar mos ravishda topilgan u_p, v_p, w_p, P_p va tuzatishlar (u_C, v_C, w_C, P_C) yig'indisi kabi ifodalanadi:

$$u = u_p + u_C, \quad v = v_p + v_C, \quad w = w_p + w_C, \quad P = P_p + \alpha_1 P_C \quad (18)$$

bu yerda α_1 - relaksatsiya parametri.

Tezliklarga tuzatishlar harakat tenglamalardagi bosim tuzatishlari bilan aniqlanadi, bunda harakat tenglamalaridagi bo'ylama konvektiv hadlar bosim gradienti hadlari bilan muvozanatlanadi deb qaraladi,

$$\rho u \frac{\partial u_C}{\partial x} = -\frac{\partial P_C}{\partial x}, \quad \rho u \frac{\partial v_C}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial P_C}{\partial y}, \quad \rho u \frac{\partial w_C}{\partial x} = -\frac{\partial P_C}{\partial z}. \quad (19)$$

Bu yerda P_C ni qandaydir potentsial funksiya (Φ ga o'xshash) deb qarash mumkin. (19) tenglamalarning chap tomonida differensiallarning ayirma analoglarini qo'llash orqali va $i-1$ tekisligida (i, j, k - x, y, z koordinata o'qlari bo'ylab tugunlar tartibi) bo'ylama koordinata, tezliklardagi tuzatishlar nolga teng deb olinganda, u_p, v_p, w_p larni quidagicha aniqlash mumkin:

$$u_C = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_C}{\partial x}, \quad v_C = -\frac{\Delta x}{L \rho u} \frac{\partial P_C}{\partial y}, \quad w_C = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_C}{\partial z}. \quad (20)$$

Tuzatilgan tezliklar uzluksizlik tenglamasini qanoatlantirishi kerak. (20) ni hisobga olib, shuningdek, u_p - to'ring har bir hisoblash nuqtasida mahalliy doimiy deb faraz qilinishidan, P_C ga nisbatan Puasson tenglamasini olamiz:

$$\frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2} + \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 P_C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_C}{\partial z^2} = \frac{u_p}{\Delta x} \left(\frac{\partial \rho u_p}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial \rho v_p}{\partial y} + \frac{\partial \rho w_p}{\partial z} \right). \quad (21)$$

(21) tenglamani yechish uchun chegara shartlari shunday tanlanadiki, ular tezlik va bosim uchun qo'yilgan chegara shartlariga mos keladi. Paragraf oxirida diffuziyali yonish paytida reaksiyaga kirishuvchi gaz aralashmalarining uch o'lchovli turbulent oqimlarini hisoblashning batafsil usuli va algoritmi keltirilgan.

Beshinchi bob "**Reaksiyaga kiruvchi gazlar aralashmasining uch o'lchamli turbulent struya diffuziya yonishini turbulentlikning algebraik modeli asosida tadqiqoti**" deb nomlangan.

§5.1 da ishlab chiqilgan hisoblash usulining samaradorligini tekshirish, turbulent yopishqoqlik koeffitsiyenti uchun taklif qilingan algebraik modellarni sinovdan o'tkazish, boshqa mualliflarning mavjud eksperimental materiallari bilan taqqoslash yo'li bilan olingan natijalarning ishonchligini tasdiqlash hamda metod va algoritmgaga oid muhim sonli tadqiqotlar keltirilgan. Uch o'lchovlilikni va struya temperaturasini hisobga olgan turbulent yopishqoqlikni hisoblash uchun algebraik modellar taklif qilindi va ko'rib chiqildi:

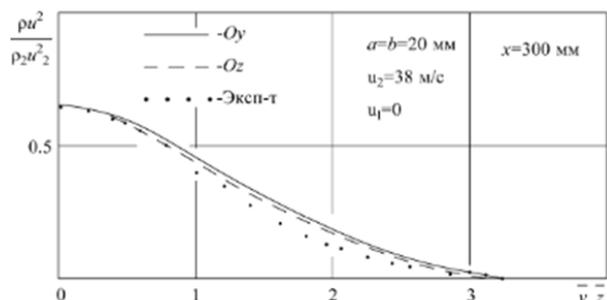
$$M1: \mu = \mu_{\pi} + \alpha \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^{\alpha},$$

$$M2: \mu = \mu_{\pi} + \alpha \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^{\alpha}, \quad (22)$$

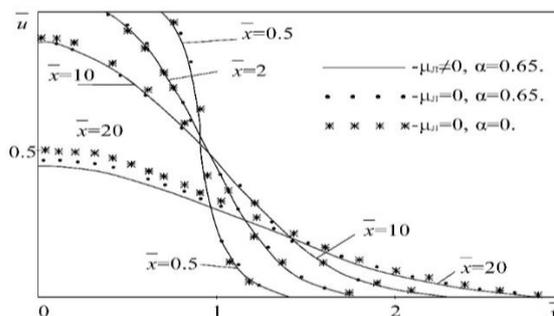
$$M3: \mu = \mu_{\pi} + \alpha \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^{\alpha},$$

$$M4: \mu = \mu_{\pi} + \varkappa \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^{\alpha},$$

bu yerda $\mu_{\pi} = \text{const} \times T^{0.6472}$, \varkappa - Karman soni, α - oqimning temperaturasini ta'sir darajasi ($0,63 < \alpha < 0,7$) va taklif qilingan $\sqrt{[b^2(Ly) + b^2(z)]}$ ifoda siljish zonasining chegarasini xarakterlaydi.



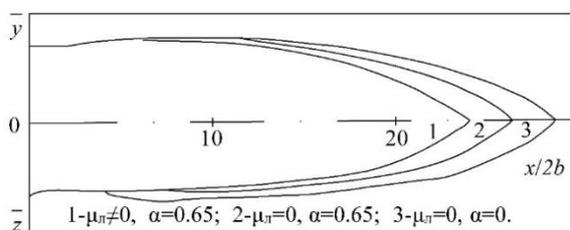
6-rasm. Impuls oqimi zichligining taqsimoti



7-rasm. Algebraik modelning har xil parametrlarida bo'yлама tezlikning o'zgarishi

Sonli natijalarni Palatnik I.B. va Temirboev D.J. larning eksperimental natijalari bilan taqqoslashda $\varkappa = 0,01$ da eng yaxshi kelishuvni bergan (6-rasm). Algebraik modellarning (M1-M4) turbulent yopishqoqlik koeffitsiyenti uchun taklif qilingan modifikatsiyalari \varkappa va α qiymatlarini tanlash asosida izotermik oqimning dastlabki qismida deyarli bir xil natijalarni olish imkonini beradi (7-rasm).

§5.2 da kvadrat soplodan chiquvchi va tinch havo muhitiga tarqaladigan propan-butan aralashmasining (massasi bo'yicha 12% yoqilg'i, 88% - molekulyar azot) uch o'lchovli turbulent diffuziya



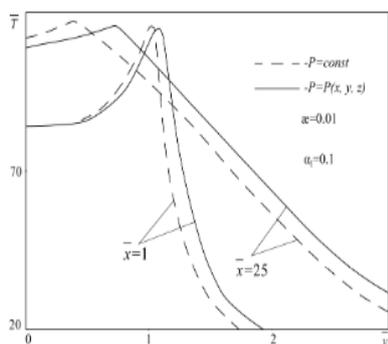
8-rasm. Turbulentlikning algebraik modelini tanlashga qarab alanga konfiguratsiyasining o'zgarishi

turbulentlikning har xil modifikatsiyalarida, struyaning bosh qismida ko'ndalang kesimlari natijalari taxminan bir xil, lekin $\mu_{\pi} \neq 0$ va temperaturani hisobga ($\alpha = 0,65$) olganda soplodan uzoqlashishi bilan oqim tezligining tez susayishi va alanga uzunligi qisqarishi kuzatiladi, ammo $\mu_{\pi} = 0$ va $\alpha = 0$ da alanga uzunligi ortadi (8-rasm).

Sonli tajribalar shuni ko'rsatdiki, $\varkappa = 0,01$ va $\alpha = 0,65$ da, ya'ni M1 modelga ko'ra olingan natijalar, L. A. Vulis, Sh. A. Yershin, Yarin LP. ishlarining tajriba natijalari va ekvivalent issiqlik o'tkazuvchanligi muammosi usuli doirasidagi taxminiy formula yordamida olingan alanga uzunligi bilan eng yaxshi kelishuvga erishiladi.

§5.3 da asosiy oqim tezligi va temperaturasinig boshlang'ich qiymatlarini, alanganing xususiyatlariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan. Asosiy oqim tezligining 18,3 dan 30 m/s gacha oshishi alanga uzunligining oshishiga olib keladi va 61 m/s gacha ortishi bilan u alanga uzunligi deyarli o'zgarmaydi. Yoqilg'i haroratini 700 K dan 1200 K gacha ko'tarilishi, L_ϕ alanga uzunligini 24 dan 28,5 kalibrgacha uzayishga olib keladi va ayni paytda alanga frontida temperatura 1700-1900 K ga etadi, bu L.A.Vulis va boshqalarning mavjud tajriba materiallari bilan tasdiqlangan.

§5.4 da bosimni o'zgarishini hisobga olishning diffuziya alanga parametrlariga ta'siri §4.5 da ishlab chiqilgan metod va hisoblash algoritmi yordamida o'rganildi. Aniqlanishicha, bosimni hisobga olish struyaning boshlang'ich qismlarida tezlik va temperaturaga sezilarli ta'sir qiladi va soplodan uzoqlashganda bosimning ta'siri ahamiyatsiz deb hisoblanishi mumkin, chunki struya doira shaklga o'tib, bosim doimiylikka intiladi



9-rasm. Izobar va izobar bo'lmagan oqimlarning temperaturalari taqsimotini taqqosi

Hisoblashlarda, relaksatsiya koeffitsiyenti α_1 quyidagi oraliqda $0 < \alpha_1 \leq 1$ o'zgargan. Bosim gradientini hisobga olingan holda o'kazilgan natijalardan ma'lum bo'ldiki, bu jarayon maksimal temperatura qiymatiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi (9-rasm) va bosimning biroz oshishi alanga zonasida kuzatiladi.

Ushbu paragrafda keltirilgan deyarli barcha natijalar ochiq struya oqimlarda, struya va alanga parametrlariga bosim gradientining roli deyarli kam ekanligini ko'rsatadi.

Oltinchi bob " **$k - \varepsilon$ turbulentlik modeli asosida reaksiyaga kirishuvchi gazlarning uch o'lchamli turbulent oqimlarining aralashish hududida issiqlik va massa almashinuvini o'rganish**" deb nomlangan va uch o'lchovli turbulent oqimlarning aralashish hududida issiqlik va massa almashinuvini jarayonini $k - \varepsilon$ turbulentlik modeli asosida organishga bagishlangan.

§6.1 da u_2^2 va u_2^3/b masshtablarni tanlash orqali mos ravishda o'lchovsiz shaklda bo'lgan turbulentlik kinetik energiyasi k ning va turbulentlik kinetik energiyasining dissipatsiyasi ε uchun tenglamalar keltirilgan:

$$\frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial z} \right) + G - \rho \varepsilon,$$

$$\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial z} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}, \quad (23)$$

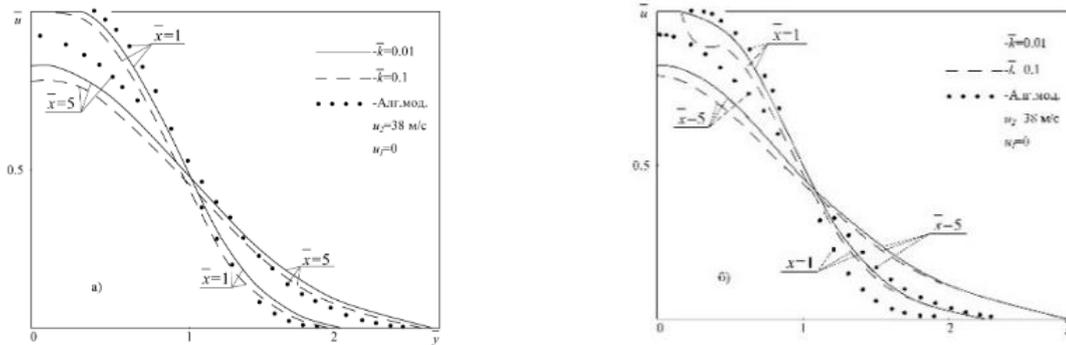
bunda $G = \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$, hamda μ_T ning k va ε orqali bog'liqligi

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (24)$$

Bu yerda C_μ , C_1 , C_2 , σ_k va σ_ε empirik doimiylardir. k va ε uchun chegara shartlari (14) keltirilgan. Differensiallarni $O(\Delta x, \Delta y^2, \Delta z^2)$ tartibli ayirma analoglari

bilan almashtirish orqali turbulentlik energiyasi dissipatsiyasi tenglamasini chekli ayirma tenglamasiga o'tish usuli ko'rsatilgan.

Sonli tajribalar yordamida kirish qismidagi k va ε qiymatlari intervallari ko'satildi va uch o'lchovli struya oqimlar uchun empirik konstantalar C_μ , C_1 , C_2 , ($C_\mu = 0.08$, $C_1 = 1.3$, $C_2 = 1.5$) qiymatlari aniqlandi, $k - \varepsilon$ va algebraik modellar yordamida izotermik struyalar uchun olingan natijalar yaxshi yaqinligi va tajriba natijalari bilan yaxshi mos kelishi tasdiqlari keltirilgan.



10-rasm. Algebraik va $k - \varepsilon$ turbulentlik modellari doirasidagi hisoblash natijalarini solishtirish a) Oy o'qi bo'ylab bo'ylama tezlik profillari va b) Oz -o'qi bo'ylab

Sonli natijalar shuni ko'rsatdiki, Oz o'qi bo'ylab k ning katta qiymatlarida oqim bosh qismi o'qi yaqinida bo'ylanma tezlik profilida egarsimon oqim kuzatildi (10-rasm. b), bu ilgari Sforz, Steiger va Trentacost mualliflari tomonidan eksperimental ravishda olingan va boshqa mualliflar tomonidan sonli tadqiqotlarda olinmagan.

§6.2 da turbulent struya oqim kinetik energiyasi k -ning boshlang'ich qiymatlarining diffuzion fakel parametrlariga ta'siri o'rganilgan. Turbulentlik energiyasi boshlang'ich qiymatlarini soplo chiqish qismida aniqlash murakkab bo'lgani uchun ilmiy ishlarda ma'lumotlar juda kam, kinetik energiya dissipatsiyasi haqidagi ma'lumotlar esa tajriba analoglariga ega emas. Shularni hisobga olib, amaliyotda yaxshi tavsiyaga ega turbulentlikning kinetik energiyasi va dissipatsiyasi uchun quyidagi bog'lanishlardan foydalaniladi:

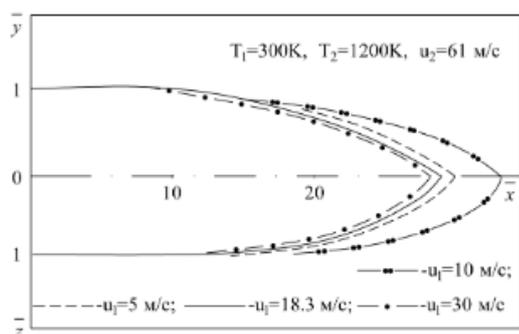
$$k_2 = \beta_2 u_2^2, \quad \varepsilon_2 = \gamma_2 k_2^{3/2}, \quad (25)$$

β_2 , γ_2 o'zgarmaslarni tanlash imkoniyati borligi, haqiqiy oqimda (24) orqali turbulent yopishqoqlikni hisoblash imkonini beradi.

Sonli tajribalar natijasida aniqlandiki, turbulentlik kinetik energiya katta boshlang'ich qiymatlarida tezlik profillari kinetik energiya kichik qiymatlariga qaraganga nisbatan tez o'zqarishi kuzatiladi, ammo alanga uzunligini qisqarishiga olib keladi.

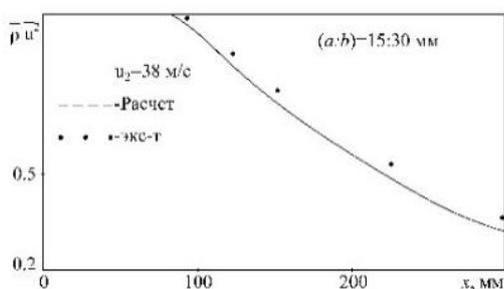
Struya va alangani doira shaklga o'tishi barcha tajribalarda kuzatiladi. Masalan, $L=1$, $T_1 = 300K$, $T_2 = 1200K$, $u_1 = 0$, $u_2 = 61$ m/s, $\bar{k} = 0,01$ variantda, chiqishdan 5 kalibrli masofada, struya kesimi va alanga shakli butunlay doira shaklga ega bo'lishi kuzatiladi.

§6.3 da yo'ldosh oqim tezligining ($m_u = u_1/u_2$ -yo'ldoshlik parametri) oqim va alanga parametrlariga ta'siri natijalari keltirilgan.



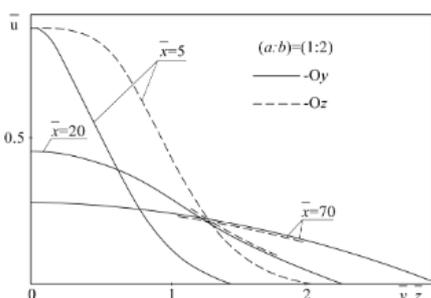
11-rasm. Yo'ldosh struya tezligining alanga shakliga ta'siri

bo'ladi, ya'ni yo'ldosh oqimning oshib borishi issiq oqimni siqadi, shuning bilan impul's yo'qolishiga to'sqinlik qiladi va oqim uzunlashishiga olib keladi.



12-rasm. Oqim zichligi taqsimoti taqqosi

bo'lgan holdagiga nisbatan alanga 10 kalibr uzunroq (to'g'ri to'rtburchak soplo tomonlariga nisbatan).



13-rasm. Izotermik struya bo'ylanma tezligining soplo tomonlar nisbati (1:2) dagi profillari

tajribalari bilan yaxshi mos keladi (12-rasm). Natijalar uch o'lchovli oqim tarqalish qonuniyatlarini to'g'ri aks ettiradi, ya'ni oqim boshlang'ich sohasi OXY va OXZ tekisliklarida chegaraviy qatlam qalinligi o'zgarish intensivligi har xil (13-rasm). Sonli natijalardan ma'lum bo'ldiki, soplo tomonlar nisbati (1:1) bo'lganda struya tarqalishi soplodan 5 kalibrgacha uning kesimi ellips shaklda bo'lib, so'ng doira shaklga o'tadi va saqlanadi, (1:2) da 20 kalibrgacha ellips shakl saqlanib so'ng doiraviy shaklga o'tib u saqlanadi va (1:4) bo'lganda ellips shakl 30 kalibrgacha saqlanib so'ng doiraviy shaklga otib yana ellips shaklga o'tish kuzatiladi.

§6.6 da to'g'ri to'rtburchak soplo tomonlari nisbati (L) va yo'ldosh oqim tezligi (m_u)-larni diffuzion alanga parametrlariga ta'siri o'rganilgan. To'g'ri to'rtburchak tomonlari nisbati (1:2) bo'lgan holdagi alanga kvadrat soplo natijasi bilan solishtirganda, alanga uzunligi taxminan 1,5 marta qisqaroq.

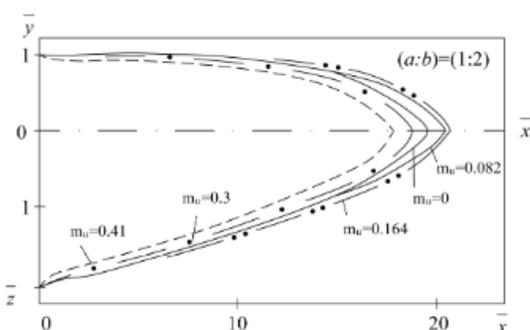
Sonli tadqiqotlar natijasida aniqlandiki, yo'ldoshlik parametri $0 \leq m_u \leq 0,164$ oraliqda bo'lganida alanga uzunligi oshib boradi, lekin bu kattalikning yanada oshishi ($0,164 < m_u \leq 0,5$) bilan yo'ldosh oqim tezligi optimal qiymati $m_u = 0,164$ dagiga nisbatan alanganing uzunligi 18-22% atrofida kamayadi (11-rasm)

Shuni ta'kidlash joizki, m_u ning oshishi oqim kengligini kamayishiga sabab impul's yo'qolishiga to'sqinlik qiladi va oqim uzunlashishiga olib keladi.

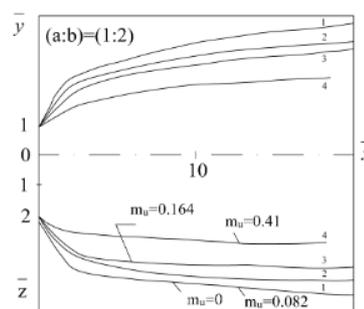
§6.4 da yonuvchi gaz konsentrasiyasining diffuzion yonishda alanga parametrlariga ta'siri o'rganilgan. Yoqilg'i konsentrasiyasining oshib borishi alanga uzunligining oshishiga olib keladi. Yo'ldosh oqim ($u_1=0$) bo'lmagan holdagi yonish jarayonida yonilg'i konsentratsiyasi $(C_2)_2 = 0,12$ bo'lgan holatda, $(C_2)_2 = 0,085$

§6.5 da to'g'ri to'rtburchakli soplo tomonlari nisbatining uch o'lchovli turbulent izotermik va noizotermik oqimlar parametrlariga ta'siri o'rganilgan. Sonli tadqiqotlarni o'kazish maqsadida tomonlari (15 mm x 30mm), (15 mm x 60mm) bo'lgan, yoki tomonlar nisbatlari (1:2) va (1:4) bo'lgan soplolar tanlandi. Olingan natijalar Palatnik I.B., Temirbayev D.J. larning olingan

Yoʻldosh oqim tezligini oshishi xuddi $L=1$ dagidek oʻxshash taʼsirga ega boʻlib, $0 \leq m_u \leq 0.164$ da alanga uzunligi ortadi, keyin esa m_u ($m_u \leq 0.41$) ortishi bilan alanga uzunligi qisqaradi, bu L.A. Vulis tajriba natijalari bilan tasdiqlangan. Yoʻldoshlik parametri m_u -ning noldan to 0,082 gacha oshishi alanga uzunligining



14-rasm. Tomonlari nisbati (1:2) da m_u rejimi parametrining turli qiymatlarida alanga konfiguratsiyasi



15-rasm. Tomonlari nisbati (1:2) da m_u rejimi parametrining turli qiymatlarida tarqalish chegarasini oʻzgarishi

bir kalibrga oshishiga olib keladi. Mavjud adabiyotlardagi tasdiqlar, ayniqsa eksperimental natijalar sonli natijalarimizni tasdiqlaydi. Shuni taʼkidlash mumkinki, yoʻldosh oqim tezligi alanga maksimal temperaturasiga sezilarli taʼsir koʻrsatmaydi va uning qiymatining oshishi struya siljish zonalarini toraytiradi (14-rasm). Toʻgʻri toʻrtburchak koʻrinishidagi soplo tomonlari nisbati (1: 4) bilan olingan alanga uzunligi, tomonlar nisbati (1:1) boʻgani bilan solishtirganda taxminan uch baravar qisqa.

Dastlabki tangensial tezlik $\omega_2 = 6,1 \text{ m/s}$ deb olinishi, alanga uzunligini $\omega_2 = 0$ dagiga qaraganda 11% ga qisqarishiga olib kelishi aniqlandi.

XULOSA

Mazkur «Ichki va tashqi fazoviy turbulent reaksiyaga kirishuvchi oqimlarda issiqlik va massa almashuvi jarayonlarni modellashtirish va sonli oʻrganish» mavzusidagi dissertatsiya ishida amalga oshirilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar keltirilgan:

1. Kesimi oʻzgarmas va oʻzgaruvchi quvurda koaksial turbulent oqimlarni qoʻshilishi va tarqalishi jarayoni toʻliq nostatsionar Nave-Stoks tenglamalari bilan modellashtirilgan va ularni yechishning sonli usuli, samarali hisoblash algoritmi va dasturi ishlab chiqilgan.

2. Tadqiqot jarayonini tipik model masalaga keltirish va uni yechish usulini samarasini oshirish uchun, fizik parametrlar va koordinatalarni oʻlchovsizlikka, qaralayotgan sohani birlik kavdratga keltirish hamda hisoblash toʻrini oqim gradiyentlari maksimal boʻlgan mintaqalarda hisoblash tekisligida qadamlarni oʻzgartirishsiz caqlagan holda hisoblash nuqtalarni quyuqlashtiruvchi funktsiyalarni qoʻllash kabi matematik almashtirishlar bajarilgan.

3. Quvurda targaluvchi struya oqimlarning tezliklari, temperaturalari, bosimlari, soplolar kirish qismi oʻchovlari boshlangʻich qiymatlari nisbatlari, quvur shakli va quvur parametrlarining qaysi olchovlarida, hamda quvur qanday kengayish burchaglarida teskari oqim mintaqalari hosil boʻlishi va boʻlmasligi aniqlangan.

4. Sohaning boshlang'ich qo'shilish chegarasida struya oqimlarning tezliklari tovush tezligidan kichik, teng va katta bo'lgan hollarida temperatura va bosim oshishi, hamda bo'ylama tezlik kamaishi effektlari aniqlangan hamda teskari oqimlar kuzatiladigan sohalarda ko'ndalang bosimning garmonik o'zgarishi kuzatilgan.

5. Ko'p komponentli gazlar uchun uch o'lchovli parabolizatsiyalangan Nave-Stoks tenglamalari asosida, tomonlar nisbati chekli bo'lgan to'g'ri to'rtburchakli soplodan tarqalayotgan turbulent reaksiyaga kirishmaydigan va kirishuvchi gaz aralashmalarining tarqalishi va diffuzion yonish jarayoni modellashtirilgan va uni sonli yechishning metodlari, algoritmlari va dasturiy ta'minotlari yaratilgan.

6. Struya oqimlar uchun mavjud turbulentlik modellari tahlil qilingan holda uch o'lchovli struya oqimlar uchun algebraik turbulentlik modeli taklif etilgan va uning tarkibidagi empirik parametrlar qiymati aniqlangan.

7. Uch o'lchovli reaksiyaga kirishuvchi turbulent struya oqimlar uchun ikki parametrli $k - \varepsilon$ modelida Prandtl-Kolmogorov gipotezasidagi empirik turbulentlik konstantalarning qiymatlari sonli tajribalar yordamida aniqlashtirilgan va shu aniqlashtirilgan empirik parametrlar orqali olingan natijalarning eksperimental natijalar bilan qoniqarli muvofiqlashtirishga erishilganligi ko'rsatilgan.

8. Aniqlandiki, yoqilg'ini boshlang'ich tezligini $u_2 \leq 40$ m/s gacha o'zgarganda alanga uzunligi oshib boradi, $u_2 > 40$ m/s bo'lganda esa kamayishga olib keladi, boshlang'ich temperaturasi $700K \leq T_2 \leq 1300K$ oraliqda o'zgarishida va konsentratsiyaning $0,085 \leq (C_2)_2 \leq 0,12$ oraliqda o'sishi alanga uzunligi oshishiga olib keladi.

9. Yo'ldosh oqim boshlang'ich tezliklari nisbatining $m_u = u_1/u_2 \leq 0,164$ gacha oshishi alanga kattalashishiga olib keladi, bu nisbatning bundan ham kattalashishi alanganing kichrayishiga va struya tarqalish sohasini siqilishga olib keladi.

10. To'g'ri to'rtburchak ko'rinishidagi soploneg tomonlari nisbati (1:1) kabi bo'lganda alanga eng katta uzunlikka ega bo'ladi, tomonlar nisbati (1:2) va (1:4) kabi bo'lganda alanga uzunligi nisbatan qisqaradi, va (1:4) alanga uzunligi (1:1) ga qaraganda 3 marta qisqaradi.

11. To'g'ri to'rtburchak ko'rinishidagi soplo tomonlari (1:2) kabi bo'lganda boshlang'ich sohada alanga shakli ellips ko'rinishida bo'ladi, soplodan uzoqlashgan sari doiraviy ko'rinishga ega bo'lib boradi va bu shakl saqlanib qoladi, tomonlar nisbati (1:4) kabi bo'lganda esa doiraviy ko'rinishga o'tish biroz kechikadi, so'ng doiraviy ko'rinishga va undan so'ng yana ellips ko'rinishga, oxirida esa yana doiraviy ko'rinishga o'tadi.

12. Olingan ayrim nazariy natijalar joriy qilinishidan ma'lum bo'ldiki, yonish qozoniga uzatiladigan yoqilg'i gaz tezligi (sarfi) va havo miqdorini talab darajasida berish tavsiyasi gazning to'liq yonishi va alangada maksimal haroratga ega bo'lishi ta'minlagan va gaz sarfini 0.9-2% gacha qisqartirgan, yoqilgi gazning toliq yonishi uchun havoning zaruriy miqdoridan 4-8 % ko'proq berilganda yoqilg'i sarfi 3-4% gacha kamaygan va tavsiya qilingan soplo geometrik o'lchamlari yoqilg'i sarfini 4% gacha qisqartirishga olib kelgan.

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

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХОДЖИЕВ САФАР

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛО - И МАССООБМЕНА ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ РЕАГИРУЮЩИХ
ГАЗОВ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc)
ДИССЕРТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент-2024

Тема докторской диссертации по техническим наукам (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2022.4.DSc/T564

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант: Арипов Мерсаид Мирсиддинович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Хужаев Исматулла Кушаевич
доктор технических наук, профессор

Хаётов Абдулло Рахмонович
доктор физико-математических наук, профессор

Джуманов Жамолжон Худойкулович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Ташкентский государственный транспортный университет

Защита диссертации состоится “22” 09 2024 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; e-mail: iktuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № _____). (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-70).

Автореферат диссертации разослан “__” _____ 2024 года.
(протокол рассылки №__ от “__” _____ 2024 г.).



М.М. Мусаев
Председатель научного совета по присуждению
учёных степеней, д.т.н., профессор

Э.Ш. Назирова
Ученый секретар научного совета
по присуждению ученых степеней
доктор технических наук, профессор

Ф.М. Нуралиев
Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире уделяется большое внимание актуальным проблемам теории турбулентности, турбулентного течения при наличии химических реакций и эффективным способам сжигания газовых смесей. Интерес к таким проблемам обусловлен увеличением числа технических приложений, как потребности химической и лазерной технологии, авиации, ядерной энергетики, создания различных смесительных и топочных устройств, камер сгорания различных энергетических установок и уменьшения выброса вредных газовых веществ в окружающей среды. В то же время, проблема адекватного описания не только трехмерных, но и даже двумерных турбулентных струйных течений не реагирующих и реагирующих газовых смесей до настоящего времени остается в механике и прикладной физике одной из самых сложных. Сложность рассматриваемой проблемы связана с одной стороны, с незавершенностью теории турбулентности, с другой – со специфическими особенностями турбулентных течений при наличии химических реакций, заключающихся в чрезвычайно сложном характере взаимного влияния процессов турбулентного переноса и кинетики на процессы тепло-и массопереноса.

В настоящее время в мире ведущими учеными ведутся научно-практические исследования, направленные на совершенствование математических моделей, эффективных методов вычисления, алгоритмов расчета и программных средств для изучения внутренних и пространственных свободных турбулентных струй, а также горение газовых смесей.

Ученые нашей республики особое внимание уделяют актуальным направлениям фундаментальных наук с научными и практическими применениями, в частности, исследованиям динамики химически реагирующих сред, незаменимым эффективным методом теоретического исследования которого является моделирование. Они особым энтузиазмом проводят исследования для процесса становления Нового Узбекистана, разработками и внедрениями в производстве, безотходной техники и технологии путем модернизации промышленности, особенно разработками технических устройств, позволяющие экономное сжигание природного газа. Создание точных и эффективных математических моделей и разработка методов, алгоритмов и программ для их решения являются важными задачами исследования процессов тепло-и массообмена в двумерных и трехмерных турбулентных потоках.

Результаты исследования, которые проводились в рамках настоящей диссертации, послужат реализации задач, определенных в Указе Президента РУз от 28 января № УП-60 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы» и в Постановлении Президента РУз № ПП-3379 от 8 ноября 2017 года «О мерах по обеспечению рационального

использования энергоресурсов», а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной области деятельности¹.

Соответствие исследования к приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан IV. «Информатизация и развитие инфокоммуникационных технологий».

Обзор научных исследований по теме диссертации².

Научные исследования по изучению задач тепло- и массообменных процессов с помощью математического моделирования и численных экспериментов с применением вычислительных методов ведутся в высших учебных заведениях и крупных научных центрах мира, в частности: NASA и Стэнфордском университете (США), Московском государственном университете и Санкт-Петербургском политехническом университете, ЦАГИ (Россия), Казахском Национальном университете (Алматы), Национальном университете Республики Узбекистан, Институте математики, Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН Республики Узбекистан.

В настоящее время ведущими учеными мира развиваются теории турбулентности, турбулентного течения и горения газов, а также математическое моделирование турбулентных струйных течений без и при наличии химического взаимодействия. Современное состояние проблемы исследований турбулентного, особенно трехмерного струйного течения регулярно обсуждается на Международных симпозиумах Союзом по теоретической и прикладной механике с участием видных специалистов США, Западной Европы, Японии и России.

Проблемы моделирования турбулентности, надежных методов расчета и экспериментальных исследования процессов тепло- и массообмена внутренних и внешних пространственных турбулентных струй содержатся в научных публикациях и монографиях зарубежных специалистов, в частности, работах: Б. Ван ден Берга (Нидерландия), И.-Д. Фагма (Германия), Ж. Кустей (Франция), Цзе Ч. Тай (США), С. Соройи и А. Д. Юнга (Великобритания), И. Сеноо (Япония) и классических монографиях : П. Роуча, Э. Орана и Дж. Бориса: Д. Андерсона, Дж. Таннехилла, Р. Плетчера, К. Флетчера: Лапина Ю.В., Стрельца М.Х., Гарбарука А. В., Шура М. Л., Лойцянского Л.Г. и др.

Степень изученности проблемы. Исследования, связанные с моделированием и численными исследованиями процессов тепло-и массообменным внутренним и внешним пространственным турбулентным струйным реагирующим течением проводились и проводятся многими учеными как, Абрамович Г.Н., Акатнов Н.И. Ф., Гинзбург И.П., Баев В.К., Бай

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28.01.2022 г. «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы»

² Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации составлен на основе следующих источников <http://www.springer.com/mathematics>; <http://www.sciencedirect.com/science/jmlallbooks/sub/mathematics>

Ши-и, Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П., Зельдович Я.Б., Лойцянский Л.Г., Лапин Ю.В., Стрелец М.Х., Поспелов В.А., Ферри А., Т.Д. Тэйлор, Э. Ндефо., Прандтль Л., Палатник И.Б., Темирбаев Д.Ж. и др.

Отечественные ученые Алиев Ф., Арипов М.М., Жумаев З.Ш., Хужаев И.К., Равшанов Н., Маликов З.М. и др. тоже внесли и вносят свой вклад в теоретическом и экспериментальном, а также численном исследовании задач многофазных и многокомпонентных реагирующих сред и горение газов.

Теоретические и экспериментальные исследования условий существования и размеров рециркуляционных зон при смешении двух потоков содержится в работах Graua A., Cyrtet R., Varchilon, работе Баева В. К. с коллегами. Однако экспериментальные исследования и обобщения касались, главным образом, случаев большого отношения площадей поперечного сечения потоков на входе в канал.

Смешения газовых струй на основе полных уравнений Навье-Стокса изучены авторами В.Н.Петров, Н.Н.Федорова, К.В.Федотова, А.Г.Егоров с коллегами, Н.Е.Шишкин и др., но не исследованы при каких параметрах спутных потоков и геометрии канала наблюдается рециркуляционная зона.

Разработка соответствующих методов расчета трехмерного струйного течения, особенно химическими реакциями затруднена вследствие отсутствия сколько-нибудь удовлетворительной модели турбулентности для трехмерных течений.

Авторами И.Б.Палатник, Д.Ж.Темирбаев, J.Way, P.L.Libby, Л.Н.Уханова, M.N.Steiger, К.Кузов, С.И.Исатаев, Р.М.Сфорца, А.П.Макашева, А.Ж.Наймановой выполнены ряд экспериментов и теоретико-численных расчетов, касающихся, главным образом течения типа струй, вытекающих из прямоугольного сопла и следов за телом, т.е. вязкого смешения в движущейся среде.

Горения неперемещаемых газов можно найти в работах Я. Б. Зельдовича, В. А. Шваба, А. А. Вулиса, Ш.А. Ершина, Л. П. Ярина, В. К. Баева и узбекских ученых Ф. Алиева, З. Ш. Жумаева, И. К. Хужаева, Маликова З. М. и др.

В приведенных работах исследования относились в основном к горению неперемешанных газов в двумерных плоских и осесимметричных турбулентных струях. Подробное численное исследование параметров факела, истекающего из сопла прямоугольной или какой-либо сложной формы, в публикациях практически отсутствует, но есть некоторые работы авторов, как В.И.Васильева с соавторами, А.А.Вулиса, Ш.А. Ершина, Л. П. Ярина, Markatos N.C.Moult A., Carpenter M. H., Patankar S.V., Spalding D., Г. А. Камалова, В. Е. Мессерле, А.Ж.Найманова, А.Б.Устименко и др., которые посвящены пространственному горению.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование проводилось в рамках научно-исследовательского проектов MRU-OT-81/2017 “Математическое моделирование термодинамически согласованной математической модели двухфазных сред в диссипативном приближении с перекрестными

эффектами» и ОТ-Ф4-30 «Исследование качественных свойств двойной нелинейной кросс-системы под влиянием конвективного смещения, переменной плотности, источника или поглощения», согласно плану научно-исследовательских работ Национального университета Узбекистана

Цель исследования - разработка моделей турбулентного течения внутренних двумерных и трехмерных реагирующих газовых смесей, усовершенствование существующих алгебраических и двухпараметрических моделей коэффициента турбулентной вязкости и разработка новых моделей турбулентности, усовершенствование методов численного решения параболизированных уравнений Навье-Стокса, а также моделирования задач гидроаэродинамики.

Задачи исследований:

развить модели, вычислительные методы, алгоритмы расчета и разработать программных средств для исследования внутренних и внешних пространственных задач турбулентных струй реагирующих газов;

исследовать процессы смешения и распространения спутных потоков в канале постоянного и переменного сечения;

исследовать соотношения исходных параметров смешивающихся потоков и геометрии канала, при которых могут возникнуть зоны рециркуляции;

исследовать начальный участок изотермической и неизотермической струи, а также струй реагирующих газов, вытекающих из сопла прямоугольной формы;

совершенствование алгебраической модели турбулентности для пространственно реагирующих турбулентных струйных течений;

усовершенствование многопараметрической модели турбулентности для пространственно-турбулентных струйных течений;

исследовать влияние исходных значений скорости, температуры, концентрации, кинетической энергии турбулентности и ее диссипации основного и спутного потока, соотношения сторон прямоугольного сопла на характеристики факела;

выявить степень пригодности полученных численных решений путем сопоставления их с экспериментальными данными и другими известными решениями.

Объект исследования служили турбулентные течения спутных потоков в каналах постоянного и переменного сечения, а также трехмерные струйные течения и диффузионный факел.

Предметом исследования являются двумерные полные уравнения Навье - Стокса и трехмерные параболизированные уравнения Навье-Стокса для вязкого многокомпонентного реагирующего газа

Методы исследования. В данной диссертации использованы методы численного решения системы нестационарных полных двумерных и трехмерных параболизированных уравнений Навье-Стокса.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

построена и численно решена математическая модель процесса смешения и распространения коаксиальных турбулентных потоков в канале постоянного и переменного сечения;

сделано математические преобразования, позволяющие сохранить консервативный вид полной системы уравнений Навье-Стокса и повысить эффективность расчетов, привести физические параметры и координаты к безразмерным, рассматриваемую область в единичный квадрат, сгущающие расчетные точки в область потока с большими градиентами газодинамических параметров;

построена и численно решена трехмерная модель процесса турбулентного горения реагирующих несмешанных газов, истекающих из прямоугольного сопла;

предложены алгебраические модели турбулентности для расчета коэффициента турбулентной вязкости изотермических, неизотермических и реагирующих трехмерных струйных газовых смесей;

определены значения эмпирических констант, входящих в двухпараметрическую $k-\varepsilon$ модель коэффициента турбулентной вязкости для расчета трехмерных турбулентных течений реагирующих газовых смесей.

Практические результаты исследования являются следующие:

построены конечно-разностные схемы и алгоритм для решения двумерных нестационарных полных уравнений Навье-Стокса, которые используются при изучении внутренних потоков;

построены конечно-разностные схемы и алгоритмы для трехмерных параболизированных уравнений Навье-Стокса, которые использованы при исследовании процесса теплообмена с диффузионным горением несмешивающихся газов.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обеспечивается строгостью постановки задачи и применением фундаментальных законов механики, а также сопоставлением некоторых полученных результатов с известными решениями и экспериментальными данными других авторов и внедрением соответствующих выводов и предложений в практику ответственными организациями.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что предложенные методы численного расчета, эффективные алгоритмы, усовершенствованные модели турбулентности служат развитию теории внутреннего и внешнего турбулентного струйного течения и горения.

Практическая значимость результатов исследований заключается в более точном исследовании внутренних потоков с помощью программного обеспечения, разработанного на основе предложенных методов и алгоритмов, при проектировании эффективных топливных печей и ракетно-космической аппаратуры, при экономичном сжигании природного газа, в обеспечении зданий чистым воздухом, решении экологических задач, таких как распространение вредных газовых выбросов в окружающую среду.

Внедрение результатов исследования. В результате использования усовершенствованных математических моделей, методов, алгоритмов и программ исследования смещения и распространения турбулентных потоков в канале и пространственного диффузионного горения достигнуты следующие результаты:

результаты численного исследования внедрены на объектах АО «Бухороэнергомарказ» (справка Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, 3/17-4/4-3678 от 13 июня 2024 г.). В результате рекомендация по подаче скорости горючего газа (расхода) и количества воздуха, подаваемого в котел сгорания, на необходимом уровне обеспечила полное сгорание газа и получить максимальную температуру в пламени и снизила расход газа на 0,9-2%;

применения результаты теоретического исследования смещения и распределения газов в канале (трубопроводе) в деятельности Каганского управления магистральных газопроводов позволили снизить распространение вредных газовых выбросов в окружающую среду в 10-12% (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, справка 3/17-4/4-3678 от 13 июня 2024 г.);

в результате применения результатов исследований по полному сгоранию природного газа на ООО «Каганские отопительные приборы» расход топлива снижен на 3-4% при подаче количества воздуха на 4-8% больше необходимого, а рекомендуемые геометрические размеры сопла позволил снизить расход топлива до 4% (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, справка 3/17-4/4-3678 от 13 июня 2024 г.);

разработанные методы и алгоритмы были применены при выполнении научно-исследовательских работ по проекту “Разработка численных алгоритмов для дифференциальных математических моделей аномальной диффузии” (Международный Казахско-Турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Яссави, 14 февраля 2024 г., номер подтверждение о внедрении 04/550). В результате внедрения построен эффективный алгоритм решения обратных задач по определению неизвестного источника для уравнения эллиптического и для смешанного параболо-гиперболического типа;

методы численного решения дифференциальных уравнений частной производной использованы при выполнении фундаментального гранта Ф2-ФА-0-83921/Ф2-ФА-Ф0383 «Сильно-коррелированные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и расчет их критических параметров» при расчете критических параметров взаимодействия сверхпроводников с магнитным материалом (Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, справка 02/14-542 от 22 февраля 2024 г.). В результате получены очень малая диссипация энергии в среде в процессе сверхпроводимости и важность влияния механического напряжения на процессы намагничивания приложенного к кристаллу;

теоретические и практические результаты были использованы при выполнении фундаментального гранта Ф-4-32 “Изучение корректности задач

объединившие в одной формулировке условия задачи Трикоми, задач со смещением и Бицадзе-Самарского для уравнения Геллерстедта с сингулярным коэффициентом” (Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, справка 02/14-542 от 22 февраля 2024 г.). В результате получены численные решения отдельных краевых задач для уравнений смешенного типа и уравнения Геллерстедта;

разработанные численные методы решения задач трехмерных параболизированных уравнений Навье-Стокса, описывающих процесс течения многокомпонентного реагирующего газа, использованы в проведение лекционной и практико - лабораторной работе в теме решения краевых задач (справка Министерства образования и науки Кыргызской Республики, Ошский технологический университет, № 09.08/365 от 26 декабря 2023 года). В результате слушатели по специальности «Информационные системы и технологии» научились построению модели пространственных течения с химическими реакциями и их численные решения.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований апробированы 9 республиканских и 21 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 60 научных работ. Из них 30 научных статей, в том числе 11 в зарубежных (7 из них входят в базу данных Scopus) и 13 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторской диссертации. Получены 3 свидетельства Агентства по интеллектуальной собственности РУз на программные продукты.

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 202 страниц, включая страницы основного текста, 10 таблиц и 160 иллюстраций, списка литературы, содержащего 226 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии исследованиям приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан, формулируются цель и задачи, а также объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

Первая глава озаглавлена «**Обзор литературы по основам теории турбулентности и моделирование турбулентных струйных течений**». В данной главе приводится обзор литературы, посвященной изучению основ теории турбулентности, исследованию турбулентного течения и горению

газов, а также математическому моделированию турбулентных струйных течений без и при наличии химического взаимодействия. Особое внимание уделено публикациям, в которых предложены модели турбулентности и методы численного исследования двухмерных и трехмерных турбулентных струй.

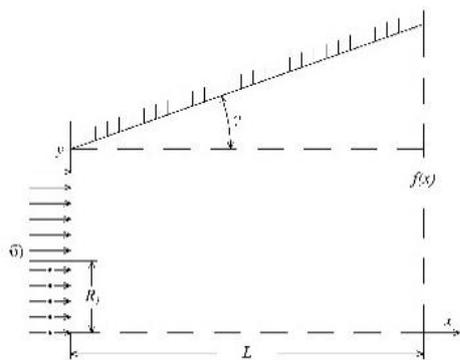


Рис. 1. Схематическая картина течения

Вторая глава озаглавлена «Численное моделирование смешения потоков в канале постоянного и переменного сечения. Постановка задачи и метод расчета». В главе приведена полная двумерная система дифференциальных уравнений Навье-Стокса для моделирования внутренних турбулентных струйных течений, сформулированы граничные и

начальные условия, характеризующие распространение спутных потоков (рис. 1) в канале постоянного и переменного сечения, а также их преобразования, как обезразмеривание пространственных координат и физических параметров введением соответствующих масштабов, проведением преобразования

$$\xi = \frac{\bar{x}}{L}, \eta = \bar{y}/f(\bar{x}), \quad (1)$$

позволяющая привести исследуемую область в квадратную, включением функции преобразования по пространственным координатам

$$F(y) = \frac{\ln[1+K_y(e-1)y]}{\ln[1+K_y(e-1)]}, \quad \varphi(x) = 1 - \frac{\ln[1+K_x(e-1)x]}{\ln[1+K_x(e-1)]}, \quad (2)$$

позволяющие сгустить расчетные точки в пристенной области и входной части канала сохраняя постоянный шаг в расчетной плоскости, где поток характеризуется большими градиентами газодинамических параметров, а также приводится метод и алгоритм решения.

Здесь же излагаются результаты методических расчетов, имеющих целью проверки эффективности разработанной методики расчета, а также подтверждающие достоверность полученных результатов.

В соответствии с преобразованиями (1) и (2) система безразмерных уравнений Навье-Стокса имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho v + \Omega \rho u) = 0, \\ & \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho u + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y (\rho u^2 + P) + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho u v + \Omega (\rho u^2 + p)) = \\ & = \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{4}{3} f F_y \varphi_x^{-1} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(\frac{4}{3} \Omega \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \Omega \right) + \frac{\partial}{Re \partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left(\left(\frac{4}{3} \Omega^2 + 1 \right) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{3} \Omega \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (3) \\ & \frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x \rho v + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y \rho u v + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x (\rho v^2 + p + \Omega \rho u v) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} f \varphi_x^{-1} F_y \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \Omega \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(-\frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} + \Omega \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\
&\quad + \frac{\partial}{Re \partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left[\left(\Omega^2 + \frac{4}{3} \right) \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{3} \Omega \frac{\partial u}{\partial y} \right]. \\
&\frac{\partial}{\partial t} f F_y \varphi_x E + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial x} f F_y (E + p) u + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_x ((E + p) v + \Omega (E + p) u) = \\
&= \frac{1}{ReL^2} \frac{\partial}{\partial x} f \varphi_x^{-1} F_y \mu \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{c_p}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\
&\quad + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} u \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{4}{3} \Omega u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{c_p}{Pr_T} \Omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\
&\quad + \frac{1}{ReL} \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} v \frac{\partial u}{\partial x} + \Omega v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4}{3} \Omega u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{c_p}{Pr_T} \Omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\
&\quad + \frac{\partial}{Re \partial y} f^{-1} F_y^{-1} \varphi_x \mu \left[\left(\Omega^2 + \frac{4}{3} \right) v \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{4}{3} \Omega^2 + 1 \right) u \frac{\partial u}{\partial y} + (\Omega^2 + 1) \frac{c_p}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial y} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{3} \Omega \left(u \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right], E = \rho C_v T + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2), P = \rho T.
\end{aligned}$$

Где L – длина, f – форма канала, $\Omega = -\eta f' / f$, K_x, K_y – константы сгущения расчетной сетки, а остальные обозначение общепринятые.

В качестве выражения для эффективной турбулентной вязкости использована формула

$$\mu = \text{const} T^{0,6472} + \varkappa \rho b^2(x) \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|; \quad (4)$$

где \varkappa – эмпирическая постоянная турбулентности; $b(x)$ – условная полуширина области перемещения.

Формулирование граничных и начальных условий. При постановке граничных условий полагается, что канал постоянного и переменного сечения является симметричным и плоским (рис.1). В этом случае можно ограничиться рассмотрением течения в области между осью симметрии и одной из стенок канала. Приведенную систему уравнений (3) соотношением (4) можно реализовать с помощью следующих безразмерных начальных и граничных условий:

$$\begin{aligned}
&\text{при } t = t_0: \\
x = 0: &\begin{cases} u = 1, v = 0, E = E_2, \mu = \mu_2, \rho = 1, p = p_2 \text{ при } 0 \leq y \leq R_1 \\ u = u_1, v = 0, E = E_1, \mu = \mu_1, \rho = \rho_1, p = p_1 \text{ при } R_1 < y < 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_\omega, \mu = \mu_\omega \text{ при } y = f_\omega = 1; \end{cases} \quad (5) \\
0 < x < 1: &\begin{cases} u = 0, v = 0, E = E_0, \rho = \rho_0, p = p_0, \mu = \mu_0 \text{ при } 0 < y < f_\omega = 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_\omega, \mu = \mu_\omega \text{ при } y = 1. \end{cases} \\
&t > t_0:
\end{aligned}$$

$$x = 0: \begin{cases} u = 1, v = 0, E = E_2, \mu = \mu_2, \rho = 1, p = p_2 \text{ при } 0 \leq y \leq R_1, \\ u = u_1, v = 0, E = E_1, \mu = \mu_1, \rho = \rho_1, p = p_1 \text{ при } R_1 < y < 1, \\ u = 0, v = 0, E = E_\omega, \rho = \rho_\omega, p = p_1, \mu = \mu_\omega \text{ при } y = 1; \end{cases} \quad (6)$$

$$0 < x \leq 1: \left\{ \begin{array}{l} u = 0, v = 0, E = \tilde{E}_\omega, \\ \rho = \tilde{\rho}_\omega, \frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = 0, \mu = \tilde{\mu}_\omega, T = \tilde{T}_\omega, \text{ или } \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0; \end{array} \right\} \text{ при } y = 1, \quad (7)$$

$$\left\{ \frac{\partial u}{\partial y} = v = \frac{\partial E}{\partial y} = 0. \right\} \text{ при } y = 0. \quad (8)$$

$$x = L: \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \text{ или } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0 \right\} \text{ при } 0 < y < 1. \quad (9)$$

Здесь ρ_1, E_1, μ_1 и ρ_2, E_2, μ_2 соответственно, вычисляются для заданных температуры T_1, T_2 и давления p_1, p_2 струи (индекс 2) и спутного потока (индекс 1). Значения $\rho_\omega, E_\omega, \tilde{\rho}_\omega, \tilde{E}_\omega, \tilde{\mu}_\omega$ вычисляется заданием граничных условий на стенке по u, v, T, P , а $u_0, E_0, \rho_0, \mu_0, T_0$ - некоторые начальные значения искоемых параметров.

Во всех вариантах на стенке ставилось условие по P в виде $\partial P / \partial \vec{n} = 0$, где постоянство P предполагается не поперек всего пограничного слоя, а только поперек прилегающего к стенке подслоя толщиной Δy .

Для численного решения уравнений Навье-Стокса (3)-(4) с начальными и граничными условиями (5)-(9), систему дифференциальных уравнений представим в векторно-консервативном виде

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = \frac{\partial V_1(U, U_x)}{\partial x} + \frac{\partial V_2(U, U_y)}{\partial x} + \frac{\partial W_1(U, U_x)}{\partial y} + \frac{\partial W_2(U, U_y)}{\partial y}, \quad (10)$$

где $U = [\varphi_x F_y f \rho, \varphi_x F_y f \rho u, \varphi_x F_y f \rho v, \varphi_x F_y f E]$ – вектор консервативных переменных: F, G, V_1, V_2, W_1, W_2 – векторы потоков.

Уравнение (10) разрешаем относительно $\partial U / \partial t$ и к полученному выражению для временной производной применяем универсальную конечно-разностную формулу

$$\Delta U^n = \frac{\theta \Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial t} \Delta U^n + \frac{\Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial t} U^n + \frac{\theta_2}{1 + \theta_2} \Delta U^{n-1} + O \left[\left(\theta - \frac{1}{2} - \theta_2 \right) \Delta t^2 + \Delta t^3 \right], \quad (11)$$

где $\Delta U^n = U^{n+1} - U^n$.

Возможности и форма записи (11) зависит от выбора значения параметров θ_2 , и θ . При $\theta_2 = 0.5$ и $\theta = 1$ схема становится неявной с трёхточечной аппроксимацией назад с точностью $O(\Delta t^3)$. Далее используем неявную факторизованную разностную схему Бима-Уорминга. Схема построена в форме приращений консервативных переменных и потоков, что обеспечивает простую запись схемы и ведет к эффективному вычислительному алгоритму. Алгоритм обладает вторым порядком аппроксимации по времени, является факторизованным и не требует итераций, а также будучи трехслойным, требует хранения информации лишь на двух временных слоях.

В конце главы в качестве методических расчетов решена задача течения воздуха в полуограниченном плоском канале с целью проверки эффективности разработанной методики расчета, а также подтверждение достоверности полученных результатов путем их сопоставления с данными других авторов. Первым шагом проверки методики было исследование скорости сходимости схемы при измельчении шага разностной сетки по

продольной и поперечной координатам, а также возможность уменьшения сходимости схемы при измельчении шага разностной сетки по продольной и поперечной координатам, а также возможность уменьшения количества расчетных точек путем построения сетки, сгущающейся в пристенной области и входной части канала использованием аналитических преобразований (2).

На рис. 2 приведены профили продольной скорости на срезе канала, рассчитанные на сетке с постоянным шагом при N_x и N_y равными 11×11 , 21×21 , 31×31 , 31×41 , 16×16 с коэффициентами сгущения $K_x = -0,4727$, $K_y = 2,6045$ и полученные результаты в сетке 31×41 на основе приближения «узкого канала». Хорошее совпадение полученных результатов свидетельствует о возможности проведения расчетов на переменной сетке,

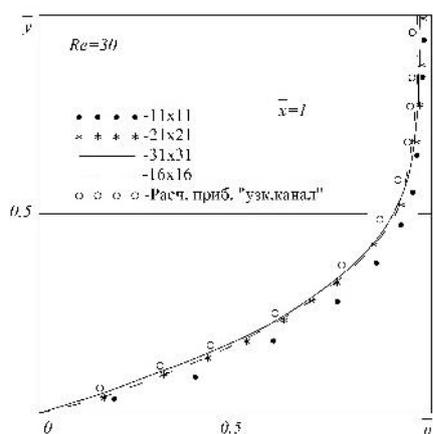


Рис. 2. Профили скорости на срезе канала при разном количестве расчетных точек в поперечном и продольном направлениях

если ее шаг в пристенной и входной частях канала совпадает с шагом равномерной сетки, а шаг в остальных областях превосходит шага равномерной сетки не более, чем в 1,5-2 раза. Один из методических вопросов был связан с возможностью изменения числа Куранта (c) и его влиянием на сходимость решения. Широком диапазоне изменения числа Куранта сходимость решений для канала постоянного сечения не превышает 100, а для переменного 170 итераций по времени при небольших Re .

Третья глава озаглавлена «Численное параметрическое исследование смешения двух потоков в плоском канале постоянного и переменного сечения». В данной главе на основе разработанного метода и алгоритма решения, а также, составленной экономичной программы, исследованы задачи смешения и распространения турбулентной струи, истекающей из коаксиальных плоских щелей струи основного и спутного потока воздуха в плоском канале постоянного и переменного сечения (рис. 1), при этом предполагается, что струи являются однородным воздухом, турбулентное число $Pr_T = 0,7$.

В качестве базового объекта исследования был выбран канал, подобный в работах Баева В.К., Бакалдиной Л.А., Сидорова И.В., с геометрическими характеристиками: $D = 188$ мм ($f_0 = 94$ мм - полувысота), $L = 1,4$ м ($L = 0,5$ м). В частности, исследуются влияния соотношения исходных значений параметров спутных потоков, как скорости ($\varphi_1 = u_2 / u_1$), входных размеров ($\varphi_2 = R_1 / f_0$), геометрических размеров ($\varphi_3 = L / f_0$), температуры ($\varphi_4 = T_2 / T_1$), и давления ($\varphi_5 = P_2 / P_1$), на смешение и распространение. В §3.1 исследовано влияние входных скоростей и геометрических соотношений размеров струи и спутного потока на развитие течения при равных температурах ($\varphi_4 = 1, T_2 = T_1 = 300K$) и давлениях ($\varphi_5 = 1, P_2 = P_1 = 1$ атм).

Численные результаты показывают, что при достаточно больших ($\varphi_1 = 45,072$, $u_2 = 311$ м/с, $u_1 = 6,9$ м/с) и малых ($\varphi_1 = 0,022$, $u_2 = 6,9$ м/с, $u_1 = 311$ м/с) отношениях скоростей наблюдается образование ниже по потоку рециркуляционную зону, которая занимает 25% входного сечения канала. В дальнейшем, потоки быстро перестраиваются и выходят на режим установления.

В §3.2 исследовано влияние неизотермичности потоков на процесс смешения и распространения струйных течений в канале постоянного сечения для вариантах $0,428 < \varphi_4 < 2,333$, $\varphi_5=1$, $\varphi_4 = 0,428$ при, $T_2 = 300$ К, $T_1 = 700$ К и $\varphi_4 = 2,333$ при $T_2 = 700$ К, $T_1 = 300$ К. При малых φ_1 , $\varphi_2 = 0,26$ и $\varphi_2 = 0,5$ ($\varphi_4 = 2,333$) в области смешения резкого изменения профиля скорости и температуры не наблюдается. При больших отношениях скоростей φ_1 и температуры φ_4 ($\varphi_1 = 72,464$ при $u_2 = 500$ м/с, $u_1 = 6,9$ м/с; $\varphi_2 = 0,26$; $\varphi_3 = 14,894$; $\varphi_4 = 2,333$) в начальном участке рециркуляционная зона занимает около 55% сечения, а вдоль канала доходит до 20 см (рис. 3), что подтверждается экспериментальными данными работ Баева В.К., Бакалдина Л. А., Константиновского В. А., Сидорова И.В.

§3.3 посвящен изучению влияния исходных соотношений температур ($0,428 < \varphi_4 < 2,333$), скорости ($0,022 < \varphi_1 < 72,464$) и входных размеров сопел ($\varphi_2 = 0,26$ и $\varphi_2 = 0,5$) в канале на особенности смешения и распространения потока воздуха при нерасчетном режиме ($1 < \varphi_5 \leq 4$). Результаты исследования показали, что увеличение температуры и давления струи приводит к появлению рециркуляционной зоны течения в начальных сечениях канала и быстрому развитию течения, а также резкому увеличению осевых значений

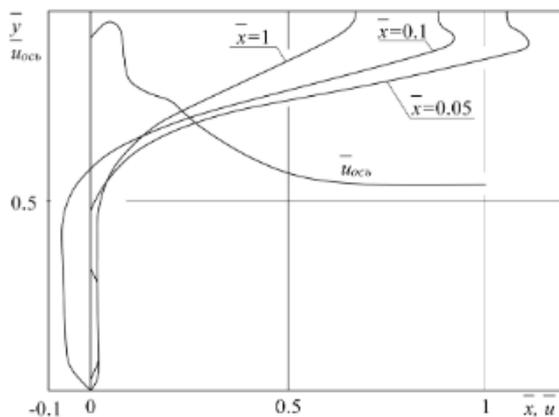


Рис. 3. Профили продольной скорости на разных сечениях канала, а также ее осевое изменения вдоль канала при $\varphi_1=72,4638$; $\varphi_2=0,26$; $\varphi_3=5,3191$; $\varphi_4=2,33$; $\varphi_5=1$

продольной скорости в начальных сечениях канала, а при удалении от входа - быстрому ее падению. В начальных сечениях ($\varphi_1=45,072$; $\varphi_2 = 0,5$; $\varphi_4 = 1,666$ при $T_2 = 500$ К, $T_1 = 300$ К; $\varphi_5 = 2$), где наблюдаются обратные течения, поперечные изменения давления гармоничные (рис. 4). В §3.4 и §3.5 исследуются струи, истекающие из плоских щелей и распространяющиеся в спутном потоке воздуха в расширяющемся канале. Исследования проводились при исходных соотношениях значений параметров спутных

потоков, как скорости $1,4705 \leq \varphi_1 \leq 71,428$ ($\varphi_1=1,4705$ при $u_2 = 500$ м/с, $u_1 = 340$ м/с и $\varphi_1 = 71,428$ при $u_2 = 500$ м/с, $u_1 = 7$ м/с); входных размеров ($0,26 \leq \varphi_2 \leq 0,5$), температуры $1 \leq \varphi_4 \leq 2,333$; давления, $1 \leq \varphi_5 \leq 2$, а также при углах степени расширения, $0 < \gamma \leq 11^\circ$.

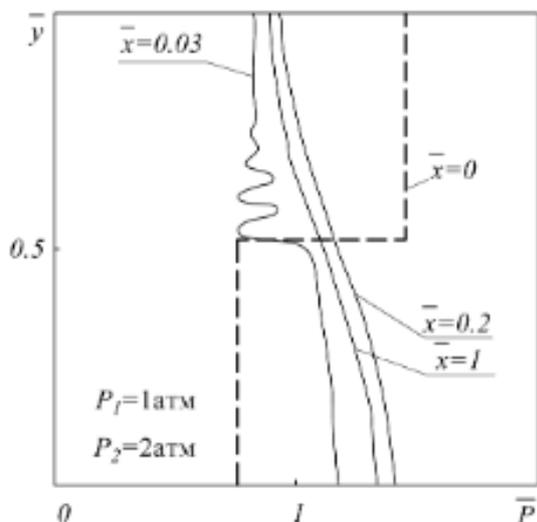


Рис.4. Поперечное распределение давления на разных расстояниях от входного сечения канала при $\varphi_1=45.0725$; $\varphi_2=0.5$; $\varphi_3=14.8936$; $\varphi_4=1.666$; $\varphi_5=2$

($\varphi_4=2,333$) и нерасчетности ($\varphi_5 = 2$), при угле степени расширения $\gamma=6^\circ$ наблюдается рециркуляционная зона пристеночной области в начальном участке канала.

Четвертая глава озаглавлена «**Основные уравнения теории трехмерных турбулентных струй реагирующих газов и их преобразования. Постановка задачи и метод решения**» В главе приводятся основные уравнения теории трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, их преобразования, постановка задачи и метод решения. В §4.1 приводятся математическая модель, описывающая трехмерные турбулентные струйные течения реагирующих газов, вытекающих из сопла прямоугольной формы (рис. 5) и краевые условия с соответствующими допущениями. Краевые условия сформулированы для струи, вытекающей из сопла прямоугольной формы и распространяющейся в спутном (затопленном) потоке воздуха.

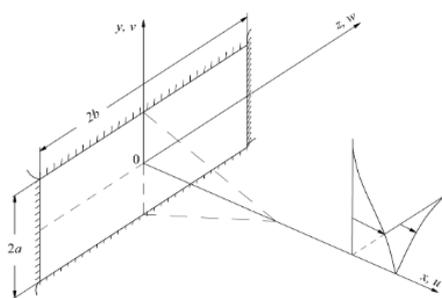


Рис. 5. Картина истечения струи из прямоугольного сопла

Из исследования выяснилось, что при равных температурах ($\varphi_4=1$) и давлениях ($\varphi_5=1$), зоны рециркуляции не прослеживаются, скорости, температура плавно изменяются по поперечному направлению вдоль канала, при $\gamma=6^\circ$ и $\gamma=11^\circ$.

§3.5 посвящен исследованию влияния соотношения температуры, скорости спутных потоков и геометрических размеров коаксиальных сопел расширяющейся канала на смешение и распространение при нерасчетном режиме.

При смешении до и около звуковых ($\varphi_1=45,072$) спутных потоков, но при больших соотношениях исходных температур

($\varphi_4=2,333$) и нерасчетности ($\varphi_5 = 2$), при угле степени расширения $\gamma=6^\circ$ наблюдается рециркуляционная зона пристеночной области в начальном участке канала.

В §4.2 описывается модель диффузионного горения пропано-бутановой смеси в воздухе и ее реализация для трехмерных турбулентных струйных течений. Показан способ приведения уравнений относительно массовой концентрации компонентов введением, непрерывно изменяющейся поперек течения струи функции концентрации \tilde{C} , позволяющая свести число уравнений с источниковыми членами до одного для четырехкомпонентной

смеси. Функция \tilde{C} принимает на срезе сопла горючего значение равное 1, а в зоне воздуха 0.

В §4.3 проводятся преобразования исходной системы уравнений и краевых условий к безразмерному, а также для удобства их численной реализации с помощью замены $y=\bar{y}/L$ ($L=a/b$, \bar{y} – безразмерная координата), приводящие выходное сечение сопла в квадратное. После чего система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \\ & \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ & \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{L \partial y} + \frac{4}{3L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{L \partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ & \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & \quad + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ & \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial H}{\partial y} + \rho w \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{L^2} \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q_{\text{дис}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{\text{дис}} &= \left(1 - \frac{1}{Pr_T} \right) \left\{ \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} + \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{Pr_T} \right) \left\{ \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \\ & \quad \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2}{3} \mu v \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu v \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2}{3} \mu w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{2}{3} \mu w \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ \rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} &= \frac{1}{L^2 Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} \right), \quad P = \rho T \sum_{i=1}^{N_K} \frac{C_i}{m_i}, \\ H &= C_p T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \sum_{i=1}^{N_K} C_i h_i^*, \\ \mu &= \mu_l + \alpha \rho (b^2(Ly) + b^2(z)) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y} \right)^2} \left(\frac{T}{T_2} \right)^a. \end{aligned} \quad (13)$$

Используется свойство центральной симметрии течения относительно оси Oх так, что позволило рассматривать только одну четверть квадрата струи, и две границы области интегрирования образуются плоскостями симметрии и из этих соображений ставятся следующие безразмерные краевые условия

$$x = 0:$$

$$0 \leq y \leq 1, \quad 0 \leq z \leq 1:$$

$$u = 1, v = 0, w = 0, H = H_2, P = P_2, \tilde{C} = 1, \mu = \mu_2 \quad (k = \bar{k}_2, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_2);$$

$$1 < y < y_{+\infty}, 1 < z < z_{+\infty}:$$

$$u = u_1, v = 0, w = 0, H = H_1, P = P_1, \tilde{C} = 0, \mu = \mu_1 \quad (k = \bar{k}_1, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_1);$$

$$x > 0:$$

$$1) z = 0 < y < y_{+\infty}; \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial H}{\partial z} = 0, \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \right);$$

$$2) y = 0, 0 < z < z_{+\infty}; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \right);$$

$$z = 0, y = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial H}{\partial z} = v = w = 0 \left(\frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial z} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \right). \quad (14)$$

$$4) z \rightarrow z_{+\infty}, \quad y \rightarrow y_{+\infty}; \quad u = u_1, v = 0, w = 0, H = H_1, P = P_1, \tilde{C} = 0 \\ (k = \bar{k}_1, \varepsilon = \bar{\varepsilon}_1).$$

Здесь индекс "2" указывает, что параметры относятся к основной (горючей) струе, а "1" – к спутной; N_y и N_z – количества точки по оси y и z ; h_i^* – теплота образования i -компоненты, а все остальные обозначения – общепринятые.

В §4.4 излагается процесс разработки алгоритма и метод расчета трехмерных изобарических турбулентных струй реагирующих газов.

Аппроксимация уравнений переноса осуществлялась неявной двухслойной по оси Ox десятиточечной схемой типа переменных направлений, заменой дифференциалов по разностным аналогам порядка $O(\Delta x, \Delta y^2, \Delta z^2)$.

В системе тип уравнений количества движения, энергии и концентрации параболический и можно получить решение, используя маршевую процедуру, соответственно направлениям оси x, z, y для определения u, v, w, H, \tilde{C} , затем вычисляем отдельные компоненты концентрации C_i и находим T из соотношения $H = C_p T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \sum_{i=1}^{N_K} C_i h_i^*$, а из уравнения состояния – плотность ρ .

Для удовлетворения уравнения неразрывности предложено разложение вектора скорости на известную, полученную из уравнений движения (u_p, v_p, w_p) и плюс поправочные (u_c, v_c, w_c) в виде

$$u = u_p + u_c, \quad v = v_p + v_c, \quad w = w_p + w_c. \quad (15)$$

Поправочные скорости с весом ρ предполагаются градиентами потенциала функции Φ :

$$\rho u_c = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \rho v_c = \frac{\partial \Phi}{L \partial y}, \quad \rho w_c = \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (16)$$

тогда из уравнения неразрывности получим уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = Q_p. \quad (17)$$

Искомые поправки к скорости (16) могут быть вычислены по распределению Φ , полученного из решения разностной уравнения (17) в поперечной плоскости (Q_p – источниковый член). В конце параграфа подробно излагается алгоритм расчета.

В §4.5 приводятся метод и алгоритма расчета трехмерных турбулентных струй реагирующих газов с учетом изменения давления в процессе тепло-и массообмена. Излагается метод использования уравнений движения и неразрывности, чтобы найти правильное распределение давления.

Последовательно решая систему уравнений (12) с помощью конечно-разностных методов с применением скалярной прогонки в плоскости YOZ , находятся промежуточные значения u_p, v_p, w_p . Истинные решения u, v, w и P выражаются соответственно, как найденные расчетные (промежуточные

u_p, v_p, w_p, P_p) плюс поправочные (u_c, v_c, w_c, P_c), введя

$$u = u_p + u_c, \quad v = v_p + v_c, \quad w = w_p + w_c, \quad P = P_p + \alpha_1 P_c. \quad (18)$$

где α_1 – параметр релаксации.

Предполагается, что поправки к скорости определяются поправками к давлению в соответствии с приближенными уравнениями движения, в которых продольные конвективные члены уравновешены членами с давлением:

$$\rho u \frac{\partial u_c}{\partial x} = -\frac{\partial P_c}{\partial x}, \quad \rho u \frac{\partial v_c}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial P_c}{\partial y}, \quad \rho u \frac{\partial w_c}{\partial x} = -\frac{\partial P_c}{\partial z}. \quad (19)$$

Здесь P_c можно считать некоторой потенциальной функцией (подобно Φ).

Применив в левой части уравнений (19) разностные аналоги дифференциалов и в предположении, что в плоскости $i-1$ (i, j, k – номера узлов по координатным осям x, y, z) по продольной координате поправки к скорости равны нулю, легко можно определить u_p, v_p, w_p :

$$u_c = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_c}{\partial x}, \quad v_c = -\frac{\Delta x}{L \rho u} \frac{\partial P_c}{\partial y}, \quad w_c = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_c}{\partial z}. \quad (20)$$

Скорректированные скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности. Учитывая (20), а также предполагая, что u_p – локально постоянная в каждой расчетной точке сетки, получим уравнение Пуассона относительно P_c :

$$\frac{\partial^2 P_c}{\partial x^2} + \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 P_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_c}{\partial z^2} = \frac{u_p}{\Delta x} \left(\frac{\partial \rho u_p}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial \rho v_p}{\partial y} + \frac{\partial \rho w_p}{\partial z} \right). \quad (21)$$

Граничные условия для решения уравнения (21) выбираются так, чтобы они были совместимыми с заданными граничными условиями для скорости и давления. В конце параграфа приводятся подробно описаны метод и алгоритм расчета трехмерных турбулентных струй реагирующих газовых смесей при диффузионном горении.

Пятая глава озаглавлена «**Исследования трехмерных турбулентных струй реагирующих газовых смесей при диффузионном горении на основе алгебраической модели турбулентности**». Глава посвящена исследованию трехмерных турбулентных струй реагирующих газовых смесей при диффузионном горении на основе алгебраической модели турбулентности.

В §5.1 излагаются некоторые результаты расчетов, проведенные с целью проверки эффективности разработанного метода расчета, выбора и апробации некоторых алгебраических моделей для коэффициента турбулентной вязкости, подтверждение достоверности полученных результатов путем их сопоставления с существующими экспериментальными материалами других авторов и некоторые численные исследования, касающиеся метода и алгоритма расчета. Были предложены и рассмотрены модели для вычисления турбулентной вязкости с учетом трехмерности и температурной неоднородности потока следующих видов:

$$\begin{aligned} M1: \mu &= \mu_n + \alpha \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^\alpha, \\ M2: \mu &= \mu_n + \alpha \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^\alpha, \end{aligned} \quad (22)$$

$$M3: \mu = \mu_{л} + \varkappa \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^\alpha,$$

$$M4: \mu = \mu_{л} + \varkappa \rho [b^2(Ly) + b^2(z)] \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \left(\frac{T}{T_2}\right)^\alpha,$$

здесь $\mu_{л} = const T^{0,6472}$, \varkappa – число Кармана, α – степень влияния температурной неоднородности потока ($0.63 < \alpha < 0.7$), а предлагаемое выражение $\sqrt{[b^2(Ly) + b^2(z)]}$ характеризует границы зоны смещения.

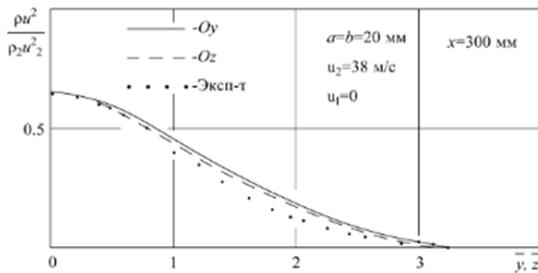


Рис. 6. Сравнение опытных и расчетных данных по распределению плотности потока импульса

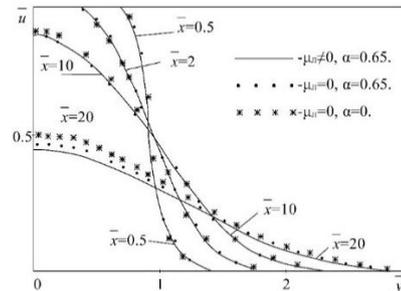


Рис. 7. Изменение продольной скорости в разных сечениях струи при выборе алгебраической модели турбулентного обмена

Сравнение численных результатов с экспериментальными данными Палатника И.Б. и Темирбаева Д.Ж. даёт наилучшее совпадение при $\varkappa = 0,01$ (рис. 6). Предлагаемые модификации алгебраической модели (M1-M4) для коэффициента турбулентной вязкости, при выборе значения \varkappa и α даёт возможность получить практически одинаковые результаты в начальном участке изотермической струи (рис. 7).

В §5.2 приводятся результаты численного исследования трехмерного турбулентного диффузионного горения пропано-бутановой смеси (12% по массе - горючего, 88% - молекулярный азот), истекающей из сопла квадратной формы и распространяющейся в покоящуюся среду воздуха. При одних и тех же входных данных струи и окислителя и при $\varkappa = 0,01$ были исследованы в разные модификации модели M1 для вычисления эффективной вязкости,

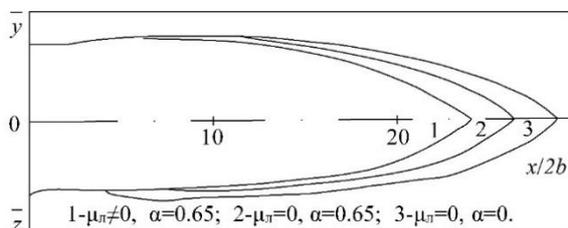


Рис. 8. Изменение конфигурации факела от зависимости выборе алгебраической модели турбулентности

учитывающей турбулентную, ламинарную, а также температурную неоднородность потока. Исследования показали, что при различных модификациях относительно коэффициента вязкости в начальных сечениях струи дают примерно одинаковый

результат, а с удалением от входного сечения сопла учет температурной неоднородности $\mu_{л} \neq 0$, $\alpha = 0,65$ приводит к быстрейшему затуханию скорости потока и к укорачиванию длины факела, а при $\mu_{л} = 0$ и $\alpha = 0$ - длина факела увеличивается (рис. 8).

Численными экспериментами установлено, что при $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,65$ по модели М1, достигается наилучшее согласование в длинах факела с экспериментальными материалами работ Вулиса Л.А., Ершина Ш.А., Ярина Л.П. по сравнению приближенной формулой, полученной в рамках метода эквивалентной задачи теплопроводности.

В §5.3 приводятся результаты исследования влияния исходных значений скорости и температуры основного потока на характеристики факела. Увеличение скорости основного потока от 18,3 до 30 м/с приводит к увеличению длины факела, а при увеличении до 61 м/с она практически не изменяется. Увеличение температуры горючего от 700 К до 1200 К длина фронта пламени L_f растет от 24 до 28,5 калибров, а при этом температура фронта достигает 1700-1900 К, что подтверждают существующие экспериментальные материалы Л. А. Вулиса и др.

В §5.4 исследовано влияние учета давления на параметры диффузионного факела, по разработанной методики и алгоритма расчета описанной в §4.5. Установлено, что учет давления заметно влияет на профили скоростей и температуры в начальных участках струи, а при удалении от среза сопла влияние давления можно считать незначительным, так как распространяющееся в свободном пространстве значения давления, быстро стремятся к постоянному. При этом в расчетах коэффициент релаксации α_1 варьировался в интервале $0 < \alpha_1 \leq 1$. Учет градиента давления существенно не влияет на максимальное значение температуры (рис. 9), а небольшой рост давления наблюдается на фронте пламени.

Практически все результаты, приведенные в данном параграфе, утверждают, что в свободных струях роль градиента давления на параметры струи и факела незначительна.

Шестая глава озаглавлена «Исследование тепло-и массообмена в

области перемешивания трехмерных турбулентных струи реагирующих газов на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности». Глава посвящена исследованию тепло- и массообмена в области перемешивания трехмерных турбулентных струй реагирующих газов на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

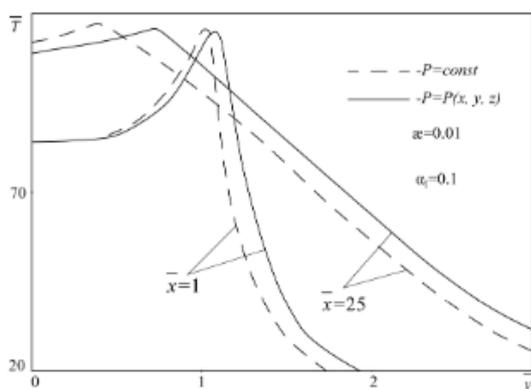


Рис. 9. Сравнение распределения температуры изобарических и неизобарических струй

В §6.1 приведены уравнения относительно кинетической энергии турбулентности k и диссипации энергии турбулентности ε имеющий

безразмерный вид соответственно выбором масштабов u_2^2 и u_2^3/b :

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} &= \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial z} \right) + G - \rho \varepsilon, \\ \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial z} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $G = \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$, а связь μ_T через k и ε задаётся по формуле

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (24)$$

Здесь $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k$ и σ_ε – эмпирические константы. Сформулированы для k и ε краевые условия. Показан способ перехода к конечно-разностным уравнениям диссипации энергии турбулентности, заменой дифференциалов на разностные аналоги порядка $O(\Delta x, \Delta y^2, \Delta z^2)$.

С помощью численного эксперимента определены интервалы значений k и ε во входном сечении и уточнены эмпирические константы C_μ, C_1, C_2 , ($C_\mu = 0.08, C_1 = 1.3, C_2 = 1.5$), при которых получены хорошо соответствующие решениям результаты, с применением алгебраической модели турбулентности и экспериментальными данными для изотермической струи.

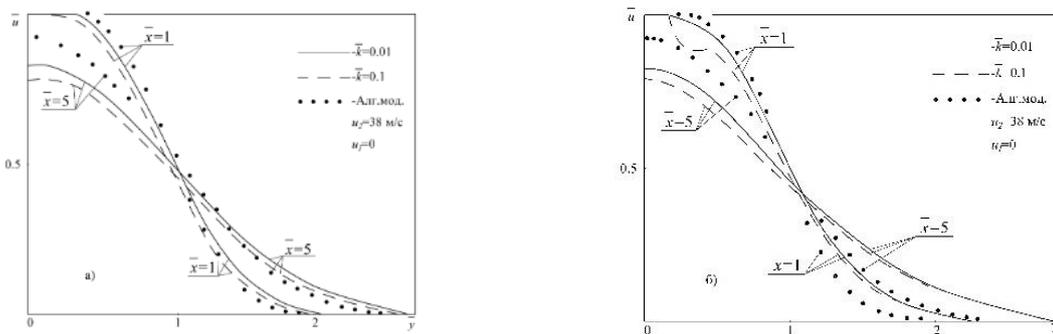


Рис. 10. Сравнение результатов расчетов в рамках алгебраической и $k - \varepsilon$ модели турбулентности: а) – профили продольной скорости по оси y , а б) – по оси z

Расчеты показали, что при больших значениях k по Oz оси наблюдалось наличие седлообразного звена в профиле продольной скорости вблизи оси течения (рис. 10b), что ранее было получено экспериментально авторами Сфорцем, Стейгером и Трентакостем, а не было получено численно другими авторами.

В §6.2 изучено влияние начального значения кинетической энергии k турбулентной струи на характеристики диффузионного факела. Из-за трудностей получения распределения характеристик турбулентности на срезе сопла, работ по определению кинетической энергии турбулентное очень мало, а скорость диссипации кинетической энергии турбулентности не имеет прямых экспериментальных аналогов. Поэтому использованы на практике хорошо зарекомендовавшие себя соотношения:

$$k_2 = \beta_2 u_2^2, \quad \varepsilon_2 = \gamma_2 k_2^{3/2} \quad (25)$$

Произвольность выбора величин констант β_2, γ_2 должно обеспечить значения турбулентной вязкости (24), соответствующих действительной картине течения.

Выявлено, что при больших исходных значениях кинетической энергии турбулентности профили продольной скорости перестраиваются быстрее относительно случаев малых их значений, а длина факела укорачивается.

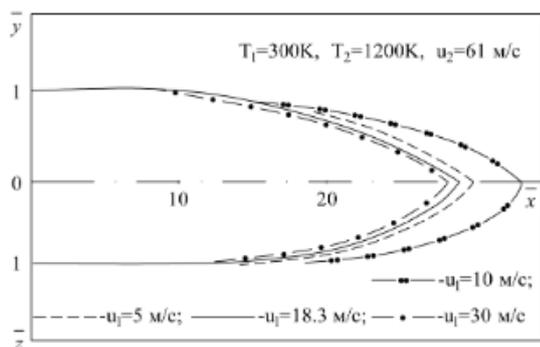


Рис. 11. Конфигурации факела при разных исходных значениях скорости спутного потока

при дальнейшем увеличении ($0,164 < m_u \leq 0,5$) длина факела укорачивается примерно на 18-22%, в сравнении с оптимальным значением $m_u=0,164$ (рис. 11).

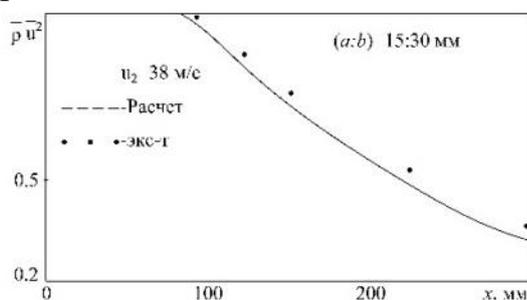


Рис. 12. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по распределению плотности потока импульса вдоль оси струи.

при диффузионном горении. Рост насыщенности горючей смеси приводит к увеличению длины факела.

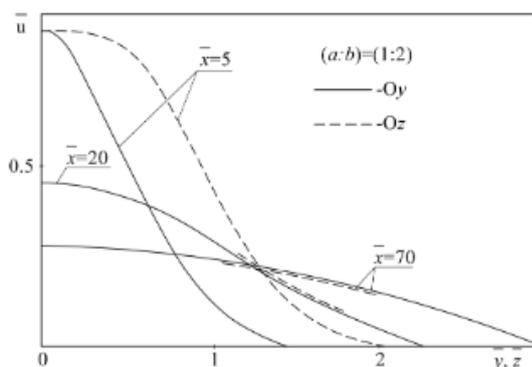


Рис. 13. Профили продольной скорости в разных сечениях изотермической струи при соотношении сторон сопла (1:2)

турбулентных струй.

Для проведения численного исследования были выбраны прямоугольные сопла с размерами сторон (15 мм x 30 мм), (15 мм x 60 мм), что составляет

При $L=1$, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 1200$ К, $u_1 = 0$, $u_2 = 61$ м/с, $\bar{k} = 0,01$ с удалением от среза сопла на 5 калибрах форма струи и факел принимает вполне круглую форму (аналог эффекта «бочки»).

В §6.3 приводятся результаты исследования влияния скорости спутного потока ($m_u = u_1/u_2$) на характеристики потока и факела.

Выявлено, что увеличение спутности потока в пределах $0 \leq m_u \leq 0,164$ длина факела увеличивается, а

Отметим, что увеличение значения m_u приводит к сужению границы зоны смещения, т.е. увеличение скорости спутного потока сжимает горючую струю, тем самым препятствуют быстрой потере импульса и, естественно, способствует дальнобойности струи.

В §6.4 исследовано влияние исходного значения концентрации горючего потока на параметры факела

Выявлено, что при затопленной струе при $(C_2)_2 = 0,12$ его длина факела по сравнению с $(C_2)_2 = 0,085$ на 10 калибров длиннее относительно сторон прямоугольного сопла (внутренний индекс указывает компоненты горючего, а внешний зону горючего).

В §6.5 исследовано влияние соотношения сторон (L) прямоугольного сопла на распространение изотермических и неизотермических трехмерных

соотношение сторон (1:2) и (1:4). Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными Палатника И.В. и Темирбаева Д.Ж. Это видно из рис. 12, где проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по распределению плотности потока импульса вдоль оси струи, при соотношении сторон сопла (1:2). Численные результаты правильно раскрывают закономерность распространения трехмерной струи, что интенсивность нарастания толщины пограничного слоя в плоскостях OXY и OXZ различна (рис. 13) в начальной участке струи. На некотором расстоянии вниз по потоку ($\bar{x} \geq 20$) профили продольной скорости по оси Y и Z становятся равными после чего обе границы зоны смещения возрастают практически одинаково. При этом струя стремится к осесимметричной и переходит в круглую форму. В начальных участках струи, при соотношении сторон (1:4) наблюдается аналогичная картина течения, но при этом переход в круглую форму затягивается ($\bar{x} \geq 30$). В этом варианте после перехода в круглую форму снова происходит переход к эллипсовидной форме, и снова в круглую.

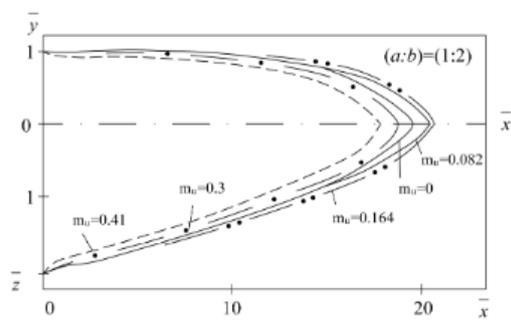


Рис. 14. Конфигурации факела при различных значениях режимного параметра m_u при соотношении сторон (1:2).

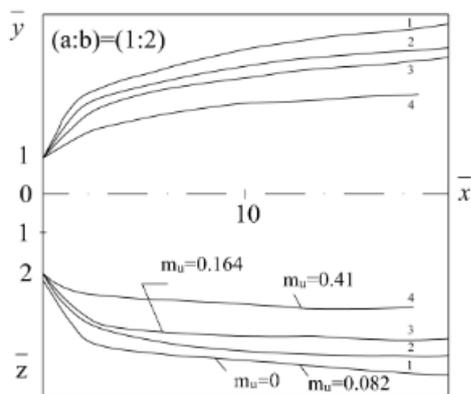


Рис. 15. Зависимость нарастания толщины зоны смещения при различных значениях режимного параметра m_u при соотношении сторон (1:2)

тангенциальной скорости $\omega_2 = 6,1$ м/с приводит к уменьшению длины факела на 11% в сравнении с ее значением, равным нулю.

В §6.6 исследовано влияние соотношения сторон прямоугольного сопла (L) и скорости спутного потока (m_u) на параметры диффузионного факела. При соотношении сторон прямоугольного сопла (1:2), по сравнению с квадратным соплом длина факела приблизительно в 1,5 раза короче. Увеличение значения спутного потока m_u аналогично влияет как и для $L=1$, что при $0 \leq m_u \leq 0.164$ длина факела увеличивается, а дальше, с увеличением m_u ($m_u \leq 0.41$) происходит укорачивание длины факела (рис. 14), что подтверждается экспериментальными материалами. Увеличение параметра спутности m_u от нуля до 0,082 приводит к увеличению длины факела на один калибр. Можно отметить, что спутности потока на максимальную температуру факела существенно не влияет, а увеличение его значения сужают зоны смещения струи (рис.15). При соотношении сторон прямоугольного сопла (1:4) длина факела укорачивается примерно в три раза, в сравнении с соотношением сторон (1:1).

Выявлено, что задание начальной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по докторской диссертации (DSc) на тему «Моделирование и численное исследование процессов тепло-и массообмена внутренних и внешних пространственных турбулентных струй реагирующих газов» представлены следующие выводы:

1. Моделирован процесс смешения и распространения коаксиальных турбулентных струй в канале постоянного и переменного сечения на основе нестационарных полных уравнений Навье-Стокса, разработаны численный метод их решения, эффективный алгоритм расчета и программный продукт.

2. С целью приближения процесса исследования к типовой модельной задаче и для повышения эффективности метода решения сделано математические преобразования, позволяющие привести физические параметры и координаты к безразмерным, рассматриваемую область в единичный квадрат, введением сгущающие функции расчетные точки в область потока с большими градиентами газодинамических параметров, сохраняя постоянный шаг в расчетной плоскости.

3. Выявлены соотношения исходных параметров смешивающихся потоков, как скорости, температуры, давления, входных размеров сопел, размеры и формы каналов, при которых может образоваться зон возвратных течений, а также определен оптимальный угол расширения, при котором отсутствуют зоны возвратных течений.

4. Выявлены эффекты увеличения температуры, давления и уменьшения продольной скорости на границе двух смешивающихся до, около и сверхзвуковых струй в начальных сечениях области перемешивания, а наблюдается гармоническое изменение поперечного давления в полях, где наблюдаются обратные течения.

5. Смоделирован процесс истечения трехмерной турбулентной нереагирующих и реагирующих газовых струй из прямоугольного сопло с конечным отношением длин сторон при диффузионном горение, на основе трехмерных параболизированных уравнений Навье-Стокса для многокомпонентных газов и созданы методы, алгоритмы и программное обеспечение для его численного решения.

6. На основе анализа существующих моделей турбулентности струйных течений предложена алгебраическая модель турбулентности для трехмерных струйных течений и определено значение содержащихся в ней эмпирических параметров.

7. Уточнены значения эмпирических постоянных турбулентности в гипотезе Прандтля-Колмогорова в двухпараметрической модели $k - \epsilon$ для трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, которые позволяют получить удовлетворительное согласие результатов с экспериментами.

8. Установлено, что увеличение исходной скорости горючего до определенного ($u_2 < 40$ м/с) значения приводит к удлинению факела, дальнейший рост – к укорачиванию, а рост температуры ($700 \text{ K} \leq T_2 \leq 1300 \text{ K}$) и концентрации ($0,085 \leq (C_2)_2 \leq 0,12$) приводит к удлинению длины факела.

9. Выявлено, что увеличение исходного значения скорости спутного потока в пределах $m_u = u_1/u_2 \leq 0,164$ удлиняет форму факела, а при больших его значениях имеет место укорачивание формы и сужение области смещения струи.

10. Установлено, что при соотношении сторон (1:1) форма факела принимает наибольшую длину, а при соотношении сторон (1:2) и (1:4) длина факела укорачивается, притом при соотношении сторон (1:4) длина факела укорачивается примерно в три раза.

11. Выявлено, что при соотношении сторон сопла (1:2) в начальных участках форма струи близка эллипсу и, с удалением от среза сопла, переходит в круглую форму, которая сохраняется, а при соотношении сторон (1:4) переход в круглую форму затягивается и переходит в круглую, а далее перейдя в форму эллипса, снова переходит в круглую форму (эффект «бочки»).

12. Из реализации некоторых теоретических результатов стало ясно, что рекомендация придавать скорость (расход) топливного газа и количество воздуха в топку котла на необходимом уровне обеспечивал полное сгорание газа и максимальную температуру в пламени, и расход газа снизился 0,9-2%; расход топлива снизился до 3-4% при подаче на 4-8% больше от необходимого количество воздуха для полного сгорания топливного газа, а рекомендуемая геометрия сопла снизила расход топлива до 4% .

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

BUKHARA STATE UNIVERSITY

KHODJIEV SAFAR

**MODELING AND NUMERICAL STUDY OF THE PROCESSES OF
HEAT AND MASS TRANSFER OF INTERNAL AND EXTERNAL
SPATIAL TURBULENT JETS OF REACTING GASES**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and complexes of applications

**ABSTRACT OF THE DOCTORAL (DSc)
DISSERTATION OF TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent - 2024

The topic of the doctoral dissertation in technical sciences (DSc) is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under B2022.4.DSc/T564

The dissertation has been prepared at Bukhara State University.

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

Scientific adviser: **Aripov Mersaid Mirsiddikovich**
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents: **Khujaev Ismatulla Kushayevich**
doctor of technical sciences, professor

Hayotov Abdullo Rakhmonovich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Djumanov Jamoljon Xudoyqulovich
doctor of technical sciences, professor

Leading organization: **Tashkent State Transport University**

The defense will take place on 27 09 2024 at 19⁰⁰ at the meeting of Scientific council No.DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100084, Tashkent city, Amir Temur street, 108 Ph.: (+99871)238-64-43, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of Tashkent University of Information Technologies (is registered under № _____. (Address: 100084, Tashkent city, Amir Temur street, 108 Ph.: (+99871)238-64-43,)

Abstract of dissertation sent out on " " 2024 y.
(Dispatching protocol № _____ on " " _____ 2024 y).



M.M. Musayev
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, professor

E.Sh. Nazirova
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, professor

F.M. Nuraliyev
Chairman of the scientific seminar
at the scientific council for awarding of
academic degrees,
Doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (Doctor of Science's Thesis Annotation (DSc))

The aim of the research work is to develop the theory of internal two-dimensional and three-dimensional turbulent jets of reacting gas mixtures, to improve existing and develop new universal models of the first and second moments regarding the coefficient of turbulent viscosity, as well as modeling problems in hydro aerodynamics.

The objectives of the study include the turbulent flows of coaxial flows in a channel of constant and variable cross-section, as well as three-dimensional jet flows and a diffusion plume.

Scientific novelty of the research work: An implicit factorized difference scheme was applied for the complete Navier-Stokes equations in the form of conservation laws based on the increment of values of conservative variables and flows, allowing for a simple recording of the scheme, and leading to an effective computational algorithm for studying the mixing of turbulent cocurrent flows in a channel of constant and variable cross-sections:

a mathematical model of the process of mixing and propagation of coaxial turbulent flows in a channel of constant and variable cross-section was constructed and numerically solved;

mathematical transformations have been made to preserve the conservative form of the complete system of Navier-Stokes equations and increase the efficiency of calculations, bring physical parameters and coordinates to dimensionless, the considered region into a unit square, condensing the calculated points into a flow region with large gradients of gas-dynamic parameters;

a three-dimensional model of the process of turbulent combustion of reacting unmixed gases flowing from a rectangular nozzle was constructed and numerically solved;

algebraic turbulence models were proposed to calculate the coefficient of turbulent viscosity of isothermal, non-isothermal and reacting three-dimensional jet gas mixtures;

The values of the empirical constants included in the two-parameter κ - ε model of the turbulent viscosity coefficient for calculating three-dimensional turbulent flows of reacting gas mixtures are determined.

Implementation of the research results:

he results of the numerical study were implemented at the facilities of Bukhoroenergomarkaz JSC (certificate from the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, 3/17-4/4-3678 dated June 13, 2024). As a result, the recommendation for supplying the speed of the combustible gas (flow rate) and the amount of air supplied to the combustion boiler at the required level ensured complete combustion of the gas and obtained the maximum temperature in the flame and reduced gas consumption by 0.9-2%;

application of the results of a theoretical study of the mixing and distribution of gases in a channel (pipeline) in the activities of the Kagan Directorate of Main Gas Pipelines made it possible to reduce the spread of harmful gas emissions into the environment by 10-12% (certificate of the Ministry of Higher Education, Science

and Innovation of the Republic of Uzbekistan, reference 3/17- 4/4-3678 dated June 13, 2024);

As a result of applying the results of research on the complete combustion of natural gas at Kagan Heating Devices LLC, fuel consumption was reduced by 3-4% when supplying an amount of air 4-8% more than required, and the recommended geometric dimensions of the nozzle allowed reducing fuel consumption to 4% (certificate of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, certificate 3/17-4/4-3678 dated June 13, 2024);

the developed methods and algorithms were applied in carrying out research work on the project “Development of numerical algorithms for differential mathematical models of anomalous diffusion” (Khoja Ahmed Yassawi International Kazakh-Turkish University, February 14, 2024, implementation confirmation number 04/550). As a result of implementation, an effective algorithm for solving inverse problems of determining an unknown source for an elliptic equation and for a mixed parabolic-hyperbolic type was constructed;

methods for numerical solution of partial differential equations were used in the implementation of the fundamental grant F2-FA-0-83921/F2-FA-F0383 “Strongly correlated interactions in superconductors and magnetic materials and calculation of their critical parameters” when calculating the critical parameters of the interaction of superconductors with magnetic material (Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, certificate 02/14-542 dated February 22, 2024). As a result, very low energy dissipation in the medium during the process of superconductivity and the importance of the influence of mechanical stress on the processes of magnetization applied to the crystal were obtained;

theoretical and practical results were used in the implementation of the fundamental grant F-4-32 “Study of the correctness of problems that combined in one formulation the conditions of the Tricomi problem, problems with mixing and Bitsadze-Samarsky for the Gellerstedt equation with a singular coefficient” (Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic Uzbekistan, certificate 02/14-542 dated February 22, 2024). As a result, numerical solutions of individual boundary value problems for mixed-type equations and the Gellerstedt equation were obtained;

The developed numerical methods for solving problems of three-dimensional parabolized Navier-Stokes equations describing the flow process of a multicomponent reacting gas were used in lectures and practical laboratory work on the topic of solving boundary value problems (reference from the Ministry of Education and Science of the Kyrgyz Republic, Osh Technological University, No. 09.08/365 dated December 26, 2023). As a result, students majoring in Information Systems and Technologies learned how to construct a model of spatial flows with chemical reactions and their numerical solutions.

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of introduction 6 chapters, conclusion, list of used literature and appendices. The total volume of the dissertation is 202.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Khodjiev S. Numerical Investigations of Tangled flows in a Channel of Constant and Variable Section at Presence of Recirculation Zone // Operator Theory: Advances and Applications. 2011, 216, pp. 233–241. **(3. SCOPUS. IF=0.7)**
2. Khodjiev S. Method and Algorithm for Calculation Isobaric and Nonizobaric Three-Dimensional Turbulent Jets of Reacting Gases // Russian Mathematics. 2023, Vol.67. № 9, pp. 34-85. **(3. SCOPUS. IF=0.9)**
3. Khodjiev S. Numerical Simulation of Compressible Gas Flow in Flat Channels in the Narrow Channel Approximation // Russian Mathematics. 2023, Vol. 67, № 9, pp. 76-85. **(3. SCOPUS. IF=0.9)**
4. Khodjiev S. A.Pirimov. A. X,Avezov. Influence of nozzle geometry on torch parameters during gas combustion // E3S Web of Conferences, 2023, 401, 01061, P.10. **(3. SCOPUS. IF=0.9)**
5. Aripov M.M., Khodjiev S. Numerical results of the study of the effect of the initial value of the fuel concentration on the parameters of the torch based on parabolized three–dimensional Navier - Stokes equations // FILOMAT. Published by the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Nis (Serbia).2024. p.10(принято на публикацию). **(3. SCOPUS. IF=1.2)**
6. Khodjiev S. Modeling and algorithm for calculation the mixing and propagation of co-current flows in channels //AIP Conf. Proc. 3004, 060013 (2024), p.11. **(3. SCOPUS. IF=0.5)**
7. S. Khodjiev. On one efficient method for calculating three-dimension alturbulent jets of reacting gases // AIP Conf. Proc. 3004, 060012 (2024), p.11. **(3. SCOPUS. IF=0.5)**
8. Ходжиев С., Йулдашев Ш.С., Махмудов С.И.. Исследование начальных участков свободных турбулентных струй вытекающих из насадок прямоугольной формы// Узбекский журнал “Проблемы механика”. Ташкент, Фан, 1992, № 3/4, с. 64-68. (05.00.00; № 6)
9. Ходжиев С., Жумаев З.Ш., Пиримов А., Муминова З.А.. Исследование трехмерных турбулентного реагирующего газа истекающего из прямоугольного сопла и распространяющегося в спутном (затопленном) потоке воздуха при диффузионном горении // Узбекский журнал “Проблемы механика”. Ташкент, Фан, 1993, № 2, с. 28-33. (05.00.00; № 6)
10. Ходжиев С., Жўраева Н.О. Численные результаты исследования влияния неизотермичности спутных потоков на параметры струи // Узбекский журнал “Проблемы информатики и энергетика”. Изд. ФАН. АН РУз. - 2008. № 6. с. 49-53. (05.00.00; № 5)
11. Ходжиев С., Жумаев З.Ш., Муминова З.А. К расчету трехмерных струй истекающий из насадки прямоугольной формы и распространяющихся в свободном пространстве окислителя // ДАН РУз, 1994, № 2, с.13-15., (05.00.00; № 9)

12. Ходжиев С., Аvezов А.Х., Муродов Ш.Н. Численные моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, истекающих из сопла прямоугольной формы, на основе алгебраической модели турбулентности // Узбекский журнал “ Проблемы информатики и энергетики”. Изд. ФАН. АН РУз. -2007. № 3. с. 47-55. (05.00.00; № 5)
13. Ходжиев С., Жумаев З.Ш., Фозилов М.Т, Исследование смешения и распространения турбулентных струй в плоском канале // Проблемы механики. Таш, Фан 1993, №3- с. 30-34.. (05.00.00; № 6)
14. Жумаев З.Ш., Ходжиев С., Юёлдошев Ш.С. Об одном методе расчета турбулентных струй, истекающих из плоской щели и распространяющихся в спутном (затопленном) потоке воздуха. // Узбекский журнал. Проблемы механики. Ташкент. ФАН. АН РУз. 1992. № 3, № 4. с. 55-60. (05.00.00; № 6)
15. Ходжиев С., Жўраева Н.О., Шарипова Н.У. Исследование влияния нерасчетности на смешение и распространение газовых потоков в канале постоянного сечения. // Научный вестник Бухарского государственного университета. БДУ. Бухара. 2007. № 2, с. 96-99. (01.00.00; № 3)
16. Ходжиев С., Аvezов А.Х., Муродов Ш.Н. Численное моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, вытекающих из сопла прямоугольной формы на основе «к-ε» модели турбулентности // Научный вестник Бухарского государственного университета. БДУ. Бухара. 2007. № 3, с. 81-87. (01.00.00; № 3)
17. Ходжиев С., Йёлдошев Ш.С., Атоев Ф.С., Савриев Ш.Ш. Численное моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов // Фан ва технологиялар тараққийети. Илмий-техникавий журнал, Бухоро, 5-сон, 2020. 130-138 б. (05.00.00; № 24)
18. Ходжиев С. Численное исследование струи, истекающей из коаксиальной щели и распространяющейся в расширяющемся канале, на основе полной системы уравнений Навье- Стокса // Проблемы вычислительной и прикладной математики. - Ташкент, № 3/ 1(50).2023. с.149-158. (05.00.00; № 23)
19. Ходжиев С. Трёхмерная модель турбулентного диффузионного горения истечение горючей смеси газа из прямоугольного сопла // Научно – технический и информационно- аналитический журнал ТУИТ. Ташкент. 2023. № 2(66). с. 40-53. (05.00.00; № 31)
20. Ходжиев С., Жамолов У.Ж., Аvezов А.Х.. Влияние начального значения кинетической энергии турбулентности на характеристики трехмерного факела // Научный вестник Бухарского государственного университета. БДУ. Бухара. -2023. № 11, с.36-41. (01.00.00; № 3)

II бўлим (Часть II; Part II)

21. Khodjiev S. Numerical modeling of three-dimensional turbulent stream of reacting gas, implying from rectangle form nozzle, on base of k - ε model of turbulence // Progress in Analysis and Its Applications, 2010, pp. 626-629.
https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814313179_0082
(Proceedings of the 7th International ISAAC Congress, Imperial College London, UK, 13 – 18 July 2009)

22. Поспелов В.А., Ходжиев С. Численное моделирование течений химически реагирующих газовых смесей на основе приближения узкого канала. // -М.: Изв.АН СССР, МЖГ, 1986. -с.187.
23. Поспелов В.А., Ходжиев С. Методика расчета стационарного течения вязкого газа в сопле Лавалья в приближении "узкого канала". // -Ташкент.:Фан.-в кн.:Движения многофазных смесей., 1985. с.70-77.
24. Применение схемы Бима-Уорминга для расчёта течений соплях Лавалья // Сб. Науч.труд. "Гидрогазодинамика" Лен. Гос. Тех. Ун –т. Л. 1990. С. 101-107.
25. Ходжиев С., Жумаев З.Ш., Фозилов М.Т.,Раззаков Ш.И. Некоторые численные результаты внутренних смещение плоских однородных до- и сверхзвуковых струй // Изв. АН УзССР, Ташкент. Фан. 1990, № 4, с 48-52.
26. Ходжиев С.,Жумаев З.Ш, Ёдгоров О.О.. Численные расчеты внутренних течений сжимаемого газа по неявнофакторизованной разностной схеме // Изв. АН УзССР, Ташкент. Фан.1990, № 2, с 28-34.
27. Жумаев З.Ш., Жумаев Ж., Ходжиев С.. Исследование круглых турбулентных струй реагирующих газов с помощью двух параметрической модели турбулентности// В кнг. Механика многофазных сред и тепло массообмена. – Ташкент. Фан, АН УзССР, 1991. С. 145-151.
28. Ходжиев С., Мухаммедов Ш. Об одном методе расчета трехмерного турбулентного течения в канале прямоугольного сечения //“Вопросы вычислительной и прикладной математики” Выпуск 97, Таш-94, с. 162-170.
29. Ходжиев С. Метод расчета и некоторые численные результаты исследовании трехмерных многокомпонентных струй реагирующих газов с учетом давления // В сб “Вопросы вычислительной и прикладной математики”. Выпумк 98, Таш, 1994, с. 133-143.
30. Khodjiev S., Jamolov U. Modeling and numerical results of investigation of the influence of the irregularity of wake jets on mixing in flat channels // International Scientific Journal. Theoretical & Applied Science. SOI: 1.1/TAS DOI: 10.15863/TAS. -2023., Issue: 11, Volume: 127, pp. 347-354.
31. Арипов М. М., Khodjiev S. Численные результаты исследования влияние исходного значения скорости и температуры горючего на параметры трехмерного факела // Тезисы докладов VII Всемирного Конгресса математиков тюркского мира (TWMS Congress-2023). 20-23 сентября, Туркистан, Казахстан, с. 401-402.
32. Aripov M.M., Khodjiev S. Modeling and numerical Calculation of chemically reacting turbulent jets based on three- dimensional Navier- Stokes equations // Abstracts. Of the 8 th international conference «Actual problems of applied mathematics and information technologies» - Al Khwarizmi 2023. September 25-26, Samarkand. Uzbekistan.p.-33.
33. Арипов М. М., Khodjiev S. Численные исследования влияние исходного значения концентрации на параметры факела // Международная научно - практическая конференция «Рахматулининские чтения» 26-27 мая Ташкент 2023. С.39-40
34. Ходжиев С., Жамолов У.Ж. Моделирование и численные результаты исследования влияния нерасчетности спутных струй // Международная научно

-практическая конференция «Рахматулинские чтения» 26-27 мая Ташкент 2023. С.85-86

35. Поспелов В.А., Ходжиев С. Влияние пористого охлаждения соплового блока на физико-химические процессы при смешении сверхзвуковых струй реагирующих газов // Ташкент: 1986, шестое Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. 24-30 сентября, 1986 – с. 522

36. Ходжиев С. Численные исследования влияния неизотермичности трёхмерных реагирующих струй на параметры факела //Тез. Докл. Международ.конф. “Математическое моделирование и вычислительный эксперимент” Таш.28-30 ноябрь 1994г – ч. 329

37 Жумаев З.Ш., Жумаев Ж., Ходжиев С. Исследование начального участка круглых турбулентных струй реагирующих газов с помощью двух параметрической модели турбулентности //Аннот, докл. Седьмого всесоюз. Съезд по теор. и прик. Механ. Москва. 15-21 августа 1992, с 155-156.

38. Ходжиев С., Фазилов М.Т. Исследование внутренних сверхзвуковых смешений //Современные проб.мех.жидк. газа. Тез докл. в международной школы семинара Самарканд 26-30 окт 1992 г. Таш.1992,-с. 85

39. Ходжиев С., Юлдашев Ш.С. Расчет трехмерных турбулентных сильных струй//Современ. проб.мех.жидки газа Тез.докл.в международной школы-семинара Таш, 1992, Самарканд, 26-30 окт. 1992 г. С 92-93

40. Жумаев З.Ш., Махмудов С.А, Ходжиев С.,. Исследование начальных участков трехмерных турбулентных изотермических и неизотермических струй истекающих из прямоугольного сопла и распространяющихся в спутном потоке воздуха // Современ. проб. мех. Жидк. и газа Тез.докл в международной школы-семинара. Самарканд .26-30 окт. 1992 г Таш 1992. с. 53-54

41. Жумаев З.Ш., Ходжиев С., Пиримов А. Исследования смешения и диффузионного горения трехмерных турбулентных струй на основе «к-ε» модели турбулентности // Тез.докл.международ.Научно-практич.конф. “проблемные вопросы механики и машиностроения” Таш.25-27 мая, 1993 г, с.65.

41. Жумаев З.Ш., Ходжиев С..Численные исследования влияние исходного значения концентрации и процессы тепло и масса обмена пространственных струй при диффузионном горении // Тез. Докл. Международ.конф. “Математическое моделирование и вычислительный эксперимент” Таш.28-30 ноябрь 1994г – с. 95

42. Ходжиев С. Исследование смешения и диффузионного горения трехмерных турбулентных струй на основе «к-ε» модели турбулентности // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Проблемы вопросы механики машиностроения» 25-27 мая 1993 г. Ташкент-1993. с. 4.С

43. Ходжиев С., Йўлдошев Ш.С., Ширинов З.З..Численные исследования трехмерных турбулентных струй реагирующих газов на основе алгебраической модели турбулентности // Халқаро микёсдаги илмий-амалий анжуман материаллари. Бухоро, 2021. 15 апрель. Бухоро-2021, с. 140-142

44. Ходжиев С., Йўлдошев Ш.С., Шукуров Ф. Метод расчета течения вязкого газа в сопле Лавалья // Материал международной научно-практической конференции. "Инновационные пути решения актуальной проблемы развития пищевой и нефтегазовых химической промышленности". 2020 г., 12-14 ноября. 3-том. Бухоро-2020. стр. 451-455.
45. Ходжиев С., Авезов А.Х., Муродов Ш.Н. Численное исследование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов вытекающих из сопла прямоугольной формы на основе «к-ε» модели турбулентности // Материалы VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPN5-2006), 26 июня – 1 июля 2006 г. Санкт-Петербург.-М.: Вузовская книга, 2006.- 368 с. с. 329-330.
46. Ходжиев С., Авезов А.Х., Муродов Ш.Н. Влияния начального значения кинетической энергии турбулентности на характеристики факела // Материалы четвертой международной конференции. Ресурс воспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения Недр. Москва-Навои 18-25 сентября, 2005 г., с. 517-518.
47. Ходжиев. Моделирование и метод расчета смешения спутных потоков каналах // Халқаро илмий –амалий анжуман матеиаллари. Амалий математика ва ахборот технологияларининг замонавий муаммолари” Бухоро,2022. 11-12 май. с.366.
48. Ходжиев С., Пиримов А.. Моделирование турбулентности и некоторые численные результаты исследований трехмерных турбулентных реагирующих струй // Халқаро илмий –амалий анжуман матеиаллари. Амалий математика ва ахборот технологияларининг замонавий муаммолари” Бухоро, 2022. 11-12 май. с. 367.
49. Ходжиев С., Авезов А.Х. Моделирование и численное исследование влияния геометрия сопла на параметры факела // Mathematical analysis and its applications in mathematical physics; international scientific conference (September 23-4,2022y.Samarkand)/ Chief Editor Lakaev S.N. -Samarkand, 2022 y.p.44-46.
50. Ходжиев С., Авезов А.Х. Численные результаты исследования струи на основе полной системы уравнений Навье –Стокса истекающие из коаксиальной щели // Mathematical analysis and its applications in mathematical physics; international scientific conference (September 23-4,2022y.Samarkand)/Chief Editor Lakaev S.N. -Samarkand, 2022 y.p.46-47.
51. Ходжиев С., Пиримов А. Моделирование и численные результаты исследования входных скоростей спутных струй на развитие течения в каналах // Международная научно-техническая конференция «Практическое применение технических и цифровых технологий и их инновационных решений», ТАТУ ФФ. Фергана, 4 мая 2023 г. С. 78-79
52. Ходжиев С.. Пространственное взаимодействие струй горячего истекающих из сопла прямоугольной формы и распространяющихся в спутном (затопленном) потоке воздуха // Тез. докл, науч. конф. “Механика и её применения” 9-11 оября,1993,Ташкент: ТашГУ, -1993. С. 91-92

53. Ходжиев С.. Решения прямой задачи сопла Лавалья методом установления // Тез. док.Респуб. Научно-техн.конф. “Механика жидкостей и многофазных сред” Ташкент 5-7 дек.Фан. -1988.– с.44.
54. Ходжиев С.. Об одном эффективном вычислительном алгоритме для решения трёхмерных задач аэродинамики // Технические и эколог. проб. развития Навайской области. Тез. докл. Конф, Навои, 20-22 мая. 1993 г., Ч.2 с. 204-205
55. Ходжиев С. Об одном подходе расчёта сохранения дисбаланса массы для исследования трёхмерных реагирующих струй // Технические и эколог. проб. развития Навойской области. Тез. докл. Конф, Навои, 20-22 мая. -1993 г. Ч.2, с. 209-210
56. Ходжиев С., Раззаков Ш.И. Численное исследование смешения плоских однородных струй // Тез. докл. респуб.конф.посвящённый памяти акад. Х.А. Рахматулина,Ташкент. -1989 г. с .48-49.
57. Ходжиев С. Исследования распространение турбулентного течения вытекающего из прямоугольной области в трехмерный канал // Технические и экологичес. Проб. Развития Навойской области “Тез. докл конф. Навои” 20-22 мая 1993 г. Ч.1. – с. 127
58. Ходжиев С. Метод расчета неизобарических трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, вытекающих из сопла прямоугольной формы// Сууюклик кўп физоли аралашмалар ва туташ мухитларда тўлқинларнинг долзарб муаммолари, Таш. 21-23 папрель, 1999 й, 2-қисм, Фан. С. 408-409
59. С.Ходжиев. Расчет трехмерного диффузионного горения // Теоретические и прикладные вопросы экологии. Тез. докладов Бухара, 23-27 ноября, 1992 г. Чита 1992. с. 25
60. Ходжиев С. Решение прямой задачи сопла Лавалья методом установления. // Механика жидкостей и многофазных сред. Тез. докладов Республиканской научно-технической конференции. Ташкент, 5-7 декабря, 1988 г. Фан, Уз ССР, 1988. С. 44.
61. Ходжиев С. Navye-Stoks tenglamalar sistemasini sonli yechish(NAVIER2)// Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ АИС РУз № DGU 29146. 07.11.2023
62. Ходжиев С. Расчет трехмерных турбулентных струй реагирующих газов (название программного средства) // АН РУз. Фонд алгоритмов программ НПО «Кибернетика». Справка № 376, 06.04.1995
63. Ходжиев С. Uch o'Ichovli parabolalashgan Navye-Stoks tenglamalar sistemasini sonli yechish // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ АИС РУз № DGU 30458. 07.11.2023