

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

**МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

МАДАЛИЕВ МУРОДИЛ ЭРКИНЖОН ЎҒЛИ

**ҲАВО СЕПАРАТОРЛАРИ ИЧИДА СОДИР БЎЛАДИГАН
ЖАРАЁНЛАРНИ КЎП ФАЗАЛИ МУҲИТЛАР НАЗАРИЯСИ АСОСИДА
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

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

Тошкент – 2020

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

Мадалиев Муродил Эркинжон ўғли

Ҳаво сепараторлари ичида содир бўладиган жараёнларни кўп фазали мухитлар назарияси асосида моделлаштириш.....3

Мадалиев Муродил Эркинжон угли

Моделирование процессов, происходящих в воздушных сепараторах на основе теории многофазных сред.....21

Madaliev Murodil Erkinjon ugli

Modeling of processes occurring in air separators based on the theory of multiphase media.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works42

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

**МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

МАДАЛИЕВ МУРОДИЛ ЭРКИНЖОН ЎҒЛИ

**ҲАВО СЕПАРАТОРЛАРИ ИЧИДА СОДИР БЎЛАДИГАН
ЖАРАЁНЛАРНИ КЎП ФАЗАЛИ МУҲИТЛАР НАЗАРИЯСИ АСОСИДА
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

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

Тошкент – 2020

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.2.PhD/FM235 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси фанлар Академияси М.Т. Ўразбоев номидаги Механика ва сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Маликов Зафар Маматкулович
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Хўжаёров Бахтиёр Хўжаёрович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Арифжанов Айбек Мухамеджанович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Тошкент ахборот технологиялари университети
ҳузуридаги Ахборот-коммуникация
технологиялари илмий-инновацион маркази

Диссертация ҳимояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.02/30.12.2019. T/FM.61.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил “2” “декабр” соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент, Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1-мажлислар зали. Тел: (99871) 262-71-52; Факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Диссертация билан Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (2 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел.: (99871) 262-71-52).

Диссертация автореферати 2020 йил «18» ноябр куни тарқатилди.
(2020 йил «18» ноябрдаги 2 рақамли реестр баённомаси)



М.М.Мирsaidов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси,
т.ф.д., профессор, ЎзР ФА академиги

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

И.Қ.Хўжаев
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д., к.и.х.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида ҳозирги вақтда замонавий саноат учун гранулометрик таркибдаги майда кукунлар катта аҳамиятга эга. Чунки майда кукунлардан кўплаб технологик жараёнларда фойдаланиш яқуний маҳсулот сифатини оширишга олиб келади. Кичик кукунларни ишлаб чиқаришнинг энг самарали ва экологик тоза усуллари марказдан қочма ҳаво сепараторларидан фойдаланишга асосланган. Бироқ, марказдан қочма сепараторлар ичида мураккаб беқарор турбулент оқим режимлари содир бўлади. Ушбу йўналишдаги экспериментал тадқиқотлар катта техник қийинчиликлар ва юқори харажатлар билан боғлиқ. Шунинг учун кўп фазали муҳитни ҳаво билан қайта ишлашни такомиллаштириш ва технологик ривожланиши ва кукунларни фракцияларга ажратиш учун янада такомиллаштирилган янги ва самарали сепараторларни яратиш фақат кўп фазали оқимларнинг аэродинамикаси соҳасидаги фундаментал тадқиқотлар асосида амалга оширилишга имкон беради.

Ҳозирги кунда жаҳонда турбулент муҳитнинг айланма ҳаракатини тавсифлайдиган турли математик моделлари ишлаб чиқилмоқда, ҳамда уларнинг турли гидродинамик муаммоларни ҳал қилишда жорий этилиши ривожланмоқда. Оқимни айлантириш кучли анизотроп турбулентликка олиб келади. Математик жиҳатдан бу масала анча мураккаб ва ҳозиргача айланма турбулент оқим учун универсал модель яратилмаган. Ушбу муаммо икки фазали полидисперс муҳит турбулент оқими учун янада мураккаблашади. Шу муносабат билан кўп фазали турбулент оқимлар учун турбулентликнинг такомиллаштирилган математик моделлари, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланади.

Мамлакатимизда ишлаб чиқариш воситалари ва материаллар ишлаб чиқаришни маҳаллийлаштиришга катта эътибор қаратилмоқда. Жумладан, самарали марказдан қочма сепараторлар ишлаб чиқилган ва турли хил дисперсияли муҳитда ишлайдиган ишлаб чиқариш объектларига жорий қилинган. Шу билан бирга 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан “...ишлаб чиқаришни..., техник ва технологик жиҳатдан янгилаш ..., юқори технологияли қайта ишлаш тармоқларини, энг аввало, маҳаллий хомашё ресурсларини чуқур қайта ишлаш асосида юқори қўшимча қийматли тайёр маҳсулот ишлаб чиқаришни жадал ривожлантиришга қаратилган сифат жиҳатидан янги босқичга ўтказиш орқали саноатни янада модернизация ва диверсификация қилиш; ... тежамкор ва самарали замонавий технологияларни босқичма-босқич жорий этиш ...”¹ лозимлиги қайд этилган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда полидисперс муҳитлар айланма турбулент оқимларининг моделини қуриш, ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ва турли хил қурилмаларнинг рационал параметрларини аниқлашга

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

имкон берадиган дастурий таъминот пакетларини яратиш муҳим аҳамият касб этади.

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

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Саноатда ишлатиладиган марказдан қочма сепараторларнинг конструкциялари турличалигига қарамай, кичик чангни ажратиш муаммоси ҳалигача ҳал қилинмаган. Масалан, бугунги кунда энг самарали марказдан қочма сепаратор «Cemtec Cement and Mining GmbH» томонидан ишлаб чиқарилмоқда. Бироқ ушбу ҳаво сепараторлари самарадорлиги 70-75 %дан ошмайди. Дунёнинг этакчи ишлаб чиқарувчилари томонидан ишлаб чиқарилган сепараторлар конструкцияларининг ўзаро ўхшашликларини ҳисобга олсак, ушбу қурилмалар ўз даврида мукамаллигига эришганлигини таъкидлаш мумкин. Ажратиш самарадорлигини ҳар бир кейинги фоизга ошириш эса аҳамиятли иқтисодий фойда келтириши мумкин. Сепараторнинг самарадорлигини ошириш учун гидродинамика қонунлари асосида кўп фазали муҳитларнинг айланма ҳаракати динамикасини ўрганиш ва айланма турбулент оқимларнинг аниқ математик моделини яратиш лозим.

Ҳозирги кунда айланма турбулент оқимлардаги жараёнларни математик моделлаштириш, тегишли муаммоларни сонли ҳал қилишнинг самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш замонавий гидромеханиканинг устувор илмий йўналишлари ҳисобланади.

Х.А. Раҳматуллин фазалар концентрациясининг ўзгариши туфайли ҳосил бўладиган қўшимча кучни 1956 йилда кашф этди ва унинг асосида кўп фазали оқимларнинг классик моделини такомиллаштирди. Кўп фазали оқимнинг классик математик моделини А. Фортье (1971) ва Р. Бусройд (1975) илмий ишларида топиш мумкин. Россия Фанлар академиясининг Ҳисоблаш марказида О.М. Белоцерковский ва Ю.М. Давидов мураккаб аэродинамик оқимларни ўрганиш учун самарали сонли усуллар ишлаб чиқишди ва кенг ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишди (1973). Р.И. Нигматулин ўз ишларида қаттиқ ва суюқ фазалар зарраларининг ўзаро таъсирини ҳисобга олди (1987). Спаларт П.Р., Аллмарас С.Р. (1992), Шур М.Л. (1997), Ментер Ф.Р. (1994), Секундов А.Н. (1995), Вилкокс Д.С. (2006) ларнинг илмий ишлари Буссинеск

гипотезасидан фойдаланган ҳолда турбулентликнинг чизиқли моделини ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришга бағишланган. Лаундер Б.Е. (1972), Роди В. (1975), Хеллистен А., Валлин С., Йохансон А.В. (2005)лар томонидан турбулентликнинг чизиқли бўлмаган моделлари ишлаб чиқилган.

Ўзбекистонда кўп фазали оқимлар назариясини ривожлантиришда Ж.Ф. Файзуллаев, А.И. Умаров, Қ.Ш. Латипов, И.Н. Хусанов, А.А. Ҳамидов, А.А. Шокиров, А.М. Арифжанов, З.М. Маликов ва бошқаларнинг хизматлари катта бўлди. Гидромеханика соҳасида кўплаб тадқиқотлар олиб борилганига қарамай, бугунги кунда марказдан қочма сепарациялаш шароитида кўп фазали полидисперс муҳитларнинг турбулент оқимини етарли аниқликда тавсифлайдиган математик моделлар мавжуд эмас.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши "Олмалиқ КМК рух заводида ишлаб чиқарилган рух кукунини ажратиш технологиясини ишлаб чиқиш ва жорий қилиш" 02-1061 сонли хўжалик шартномаси асосидаги иш ва Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг Механика ва иншоотлар мустақамлиги институти ишланмаларининг тижоратлаштиришни таъминлаш учун "Йўл харитаси" га мувофиқ "Олмалиқ КМК" ОАЖ рух заводида рух кукунни пуркаб бериш учун модернизацияланган форсунка синовини амалга ошириш жараёни доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади икки фазали полидисперс муҳитлар турбулент оқимларининг математик моделини қўллаш орқали марказдан қочма сепаратор конструкциясининг мақбул параметрларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кичик дисперсияли кукунларни қуруқ ажратиш учун сепараторлар конструкцияларни таҳлил қилиш;

адабиётлар шарҳи асосида икки фазали муҳитда куч омилларини қиёсий баҳолаш;

марказдан қочма сепараторда қаттиқ полидисперс зарралар билан бирга айланма ҳаракат қилаётган газ турбулент оқимининг математик моделини ишлаб чиқиш;

турли хил турбулентлик моделлари ёрдамида айланма ҳаракат қиладиган икки фазали турбулент оқимни сонли моделлаштириш;

қаттиқ заррачалар билан айланма ҳаракат қиладиган газ оқими учун энг мос турбулентлик моделини аниқлаш;

сепараторнинг самарадорлигини аниқлаш усулини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида саноатда кенг қўлланиладиган марказдан қочма сепараторлар қаралди.

Тадқиқотнинг предметини марказдан қочма сепаратор ичидаги икки фазали турбулент айланма оқимларнинг математик модели ташкил этди.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотни бажаришда гидромеханиканинг чизиқли бўлмаган тенгламалари асосида икки фазали муҳитларни математик моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибаси усулларида, ишлаб чиқилган сепаратор самарадорлигининг лаборатория синовларида электрон

микротарозилар, замонавий анемометр, микроскоп ва бошқа ўлчов асбобларидан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор фазалараро ўзаро таъсирни ҳисобга олган ҳолда, Рейнолдс кучланишлари RSM турбулентлигининг чизиқли бўлмаган модели ёрдамида сепаратордаги икки фазали айланма оқимнинг математик масаласи тузилди ва унинг бошқа моделларга нисбатан адекватлик жиҳатдан устунлиги исботланган;

чизиқли бўлмаган турбулентлик модели асосида Рейнольдс тенгламалар системасини янги ўзгарувчилар асосида сонли ечиш усули ишлаб чиқилган;

янги марказдан қочма сепараторнинг ёрдамчи элементларининг оптимал параметрларини сонли ҳисоблаш услуби и дастури ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган трапециясимон куракчалар асосида куқунларни ажратиш учун юқори самарали марказдан қочма сепаратор яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

икки фазали турбулент оқимнинг самарали моделини ишлаб чиқиш;

бир ва икки фазали турбулент оқимларни ўрганиш учун дастурий таъминотни ишлаб чиқиш;

сепаратор самарадорлигини 89% дан 92% гача оширишга имкон берадиган оқим уюрма ҳосил қиладиган куракнинг мақбул оптимал параметрларини аниқлаш;

сепараторга киришда оқим оптимал тезлигини аниқлаш имконини берди.

Назарий тадқиқотларнинг ушбу натижалари самарадорлиги 70% дан ортиқ бўлган саноат сепараторини лойиҳалаш имконини берди. Янги яратилган марказдан қочма сепараторни чангтуткич сифатида ҳам ишлатса бўлади.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Олинган назарий ва сонли натижалар лаборатория шароитида ўтказилган тажриба ўлчовлари натижалари билан таққосланди ва улар орасидаги фарқ 5% дан ошмаслиги кўрсатилди.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, илк маротаба марказдан қочма сепаратор параметрларини ҳисоблаш учун икки фазали турбулент оқимнинг аэродинамикасининг қатъий асосланган натижалари қўлланилган. Бунгача эса асосан сепаратор ичида содир бўлаётган турли жараёнларнинг физик моҳиятини очиб бермайдиган эмпирик ҳисоблаш усуллари қўлланилган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, ярим эмпирик турбулентлик моделидан фойдаланган ҳолда сепараторни ҳисоблашнинг сонли усули таклиф қилинган. Диссертация натижалари нафақат сепараторларни ишлаб чиқиш, балки самарали чанг туткичлар, гидроциклонлар, миксерлар ва бошқа қурилмаларни лойиҳалаш учун ҳам фойдалидир.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Марказдан қочма сепаратордаги икки фазали полидисперс мухитлар турбулент оқимларини ўрганиш бўйича олинган натижалар асосида:

марказдан қочма сепаратор конструкциясининг мақбул параметрлари Олмалик кон-металлургия комбинати учун рух кукуни ажратгичини ишлаб чиқаришга жорий этилган (Олмалик кон-металлургия комбинати ОАЖнинг 2020 йил 21 февралдаги АС-01441-сон маълумотномаси). Натижада, ўртача катталиги 7 микрон бўлган (ГОСТ 12601-76) ПЦ-4 рух кукунини ажратиш имкони яратилган;

сепаратор ичида кечадиган жараённинг аэродинамикасини ўрганиш натижалари қурилма рационал параметрларини топишга қўлланилган (Олмалик кон-металлургия комбинати ОАЖнинг 2020 йил 21 февралдаги АС-01441-сон маълумотномаси). Натижада, ишлаб чиқариш жараёнида рух кукуни ажратгичининг Ф.И.К.ни 50% дан 70% гача оширишга эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 2 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола, 5 таси республика ва 4 таси хорижий журналларда нашр этилган. ЭХМ учун дастурий маҳсулот қайд этилганлиги ҳақида 3 гувоҳнома олинган, ихтирога ариза берилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, уч боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 101 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мувофиқ асосланган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объекти ва предмети кўрсатилган, натижаларнинг ишончлилиги асосланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга татбиқ этиш рўйхати, нашр этилган ишлар келтирилган ва диссертация таркиби тўғрисида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг биринчи боби "**Сепаратор ичида содир бўладиган жараёнларни математик моделлаштириш**" деб номланган.

Биринчи параграфда қурилиш материаллари ишлаб чиқиш саноатида қўлланиладиган кичик дисперсияли кукунларни ажратувчи асосий ускуналар кўриб чиқилган.

Иккинчи параграфда айланма турбулент оқимда қаттиқ аэрозол

зарраларига таъсир қилувчи кучларнинг ҳосил бўлиши таҳлил қилинган. Ушбу кучларнинг катталиклари баҳоланган.

Учинчи параграфда турбулентликни моделлаштиришнинг асосий ёндашувлари муҳокама этилган.

Тўртинчи параграфда турбулентликнинг айрим чизиқли моделлари тавсифланган.

Спаларт-Алларас модели турбулентликнинг бир параметрли моделлари синфига мансуб. Уюрмали оқимда ёпишқоқликнинг кинематик коэффицентини ҳисоблаш учун фақат битта қўшимча тенглама пайдо бўлади:

$$\frac{d\tilde{v}}{dt} = C_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{v} - \left[C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{k^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 + \frac{\nabla[(v + \tilde{v})\nabla\tilde{v}]}{\sigma_v} + \frac{C_{b2}(\nabla\tilde{v})^2}{\sigma_v}. \quad (1)$$

Турбулент уюрмали ёпишқоқлик қуйидагича ҳисобланади: $v_t = \tilde{v}f_{v1}$.

Ментернинг SST модели k - ε ва k - ω моделларининг суперпозицияси тарзида ёзилган. Қаттиқ деворга яқин соҳада k - ω моделини қўллашдан девордан узоқ жойларда k - ε моделига силлиқ ўтиш учун F_1 эмпирик функцияси киритилади:

$$\begin{cases} \frac{dk}{dt} = \nabla[(\mu + \sigma_k\mu_t)\nabla k] + Pf_{rot} - \beta^* \omega k, \\ \frac{d\omega}{dt} = \nabla[(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\nabla \omega] + \frac{\gamma}{v_t} Pf_{rot} - \beta\omega^2 + 2(1 - F_1)\frac{\sigma_{\omega^2}}{\omega} \nabla \omega \nabla k. \end{cases} \quad (2)$$

Турбулент ёпишқоқлик $\nu = k / \omega$ формула бўйича ҳисобланади.

Бешинчи параграфда Рейнольдс кучланишили чизиқли бўлмаган турбулентлик моделлари муҳокама этилган. Тўлиқ иккинчи моментли Рейнольдснинг кучланиш моделлари битта тенгламага эга содда чизиқли ва чизиқли бўлмаган моделлардан катта фарқ қилади, чунки иккинчи момент орқали Рейнольдс кучланишлари τ_{ij} нинг бошқа тензорларга нисбатан кучланишини берадиган конститутив муносабат (масалан, Буссинеск гипотезаси) қўлланилади. Бошқа томондан, тўлиқ иккинчи моментли Рейнольдснинг кучланиш моделлари ҳар 6 Рейнольдс кучланишининг ҳар бирини тўғридан-тўғри ҳисоблайди (Рейнольдснинг кучланиш тензори симметрик ва шунинг учун 6 та мустақил ҳад мавжуд). Ҳар бир Рейнольдс кучланиши ўзининг тенгламасига эга. Турбулентлик масштабини аниқлайдиган ўзгарувчи учун еттинчи тенглама ҳам мавжуд. Тўлиқ Рейнольдс кучланиш модели SSG/LRR- ω ва узунлик масштаби тенгламалари қуйидагича берилади:

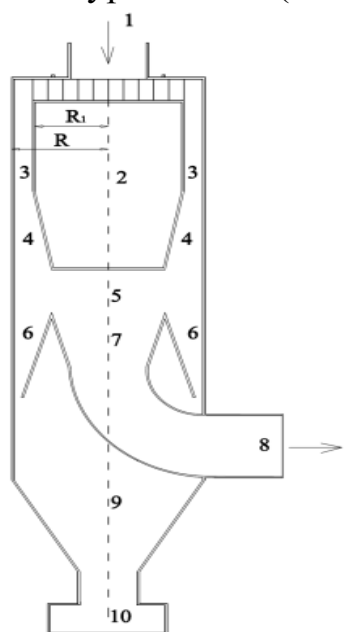
$$\begin{cases} \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial U_k R_{ij}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} + D_{ij}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial U_k \omega}{\partial x_k} = \frac{a_\omega \omega}{k} \frac{P_{kk}}{2} - B_\omega \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu + \sigma_\omega \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \right) + \sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (3)$$

бу ерда $\rho R_{ij} = -\tau_{ij} = \rho u'_i u'_j$; P_{ij} – Рейнольдс кучланишини генерацияси; D_{ij} – диффузия; ε_{ij} – диссипация; Π_{ij} – босимнинг қайта тақсимлаш ҳади.

Диссертациянинг иккинчи боби **"Марказдан қочма сепараторни сонли ўрганиш"** деб номланган.

Биринчи параграфда муаммонинг физик ва математик қўйилиши шакллантирилган.

1-расмда янги ишлаб чиқилган марказдан қочма сепараторнинг ўқ кесими кўрсатилган (патент учун ариза IAP 69152).



1-расм. Янги конструкцияли сепараторнинг ўқ кесимидаги кўриниши

Қаттиқ заррачали ҳаво оқими кириш 1 қувири орқали кириб келади. Оқим олдида цилиндр шаклида бошланиб, кесик конус билан тугайдиган ичи бўш жисм жойлашган. Ушбу жисмнинг кириш қисмида спирал сирт шаклида оқим йўналтиргичлари ўрнатилган. Улар айланма тезликни ҳосил қилишади. Заррачали оқим ташқи радиуси R ва ички радиуси R_1 бўлган цилиндр тирқиш 3 га киради.

Бўш жисм 2 атрофидан айланиб ўтгандан сўнг оқим янги тартибга солинади ва цилиндр шаклидаги пона ёрдамида 6 ва 7 қисмларга бўлинади. Марказдан қочма куч туфайли массив зарралар ташқи оқим 6 га келиб қўшилади. Енгил зарралар ҳаво оқими 7 билан сўриш қувири 8 орқали чиқариб юборилади. Тораювчи цилиндрик оралиқ 6 га тушган оғирроқ заррачалар сокин соҳа 9 га ўтишади. Гравитация кучи таъсирида улар ҳаракатланиб, бункер 10 га тўпланишади.

Икки фазали кўп компонентали муҳит ҳаракатини цилиндрик (z, r) координаталарда тавсифлаймиз. z ўқи ичи бўш жисм юқори қисмининг ўртасидан бошланади ва пастга йўналтирилади. Радиал r координата z ўқидан бошланади ва ташқарига йўналтирилади. Ҳаво тезлиги векторининг бўйланма, радиал ва тангенциал компоненталари U , V ва W билан, i -чи фракция заррачалари тезликлари U_{pi} , V_{pi} ва W_{pi} билан белгиланади. Оқимни ўққа нисбатан симметрик деб ҳисоблаймиз. Ҳисоблаш ишлари 3, 4, 5, 6 ва 7 (тозаланган ҳаво учун кесик конус) соҳалари учун олиб борилади. 9 соҳа, юқорида айтиб ўтилганидек, сокин соҳани англатади. Тирсак ва чиқиш қувурлари ҳисоблаш соҳасига кирмайди. Оқимни турбулент деб, заррачалар мавжудлиги оқим зичлиги ρ қийматининг аҳамиятли ўзгаришига олиб келмайди деб ҳисоблаймиз. Заррачалар ҳақиқий зичлик ρ_p га эга, ўртача диаметрлари δ_i бўлган N фракциялардан ташкил топган. i -чи фракциянинг сақланиш тенгламаси ҳисобга олинганда, дифференциал тенгламалар

системаси қуйидагича бўлади:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (U - U_{pi}), \\ \frac{dV}{dt} - \frac{W^2}{r} + \frac{\partial p}{\rho \partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \frac{v_{eff}}{r^2} V - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (V - V_{pi}), \\ \frac{dW}{dt} - \frac{VW}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{v_{eff}}{r^2} W - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{dU_{pi}}{dt} = k_i (U - U_{pi}), \quad \frac{dV_{pi}}{dt} - \frac{W_{pi}^2}{r} = k_i (V - V_{pi}), \quad \frac{dW_{pi}}{dt} - \frac{V_{pi} W_{pi}}{r} = k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{d\rho_i}{dt} = D \left(\frac{\partial^2 \rho_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial z^2} \right), \quad D = \frac{\rho}{\rho + \rho_\rho} \frac{\nu + \nu_t}{Sc}, \quad \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial r V}{r \partial r} = 0, \\ i = 1..N, \quad v_{eff} = \nu + \nu_t. \end{array} \right. \quad (4)$$

Бу ерда p – босим; ν, ν_t – ҳавонинг ламинар ва турбулент кинематик қовушқоқлик коэффициентлари; $k_i = \frac{18\rho\nu}{\rho_\rho \delta_i^2}$ – i -чи фракция учун Стокс параметри; $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial z} + V \frac{\partial}{\partial r}$ – субстанционал ҳосила; D – қаттиқ фаза учун диффузия коэффициенти; $Sc = 0.8$ – Шмидт сони.

Кириш кесими $z = 0$ да қуйидаги чегаравий шартлар берилади:

$$U(0, r, t) = U_{pi}(0, r, t) = U_{\infty}, \quad V(0, r, t) = 0, \quad W(0, r, t) = W_{pi}(0, r, t) = W_{\infty}, \quad \frac{\partial p(0, r, t)}{\partial r} = \frac{\rho W^2}{r}.$$

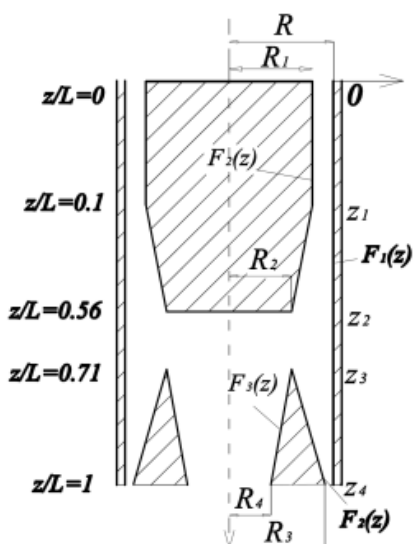
Деворларда ёпишқоқлик шarti – $\Phi(z, R, t) = 0$, бунда $\Phi = U, V, W, U_{pi}, V_{pi}, W_{pi}$.

Оқим ўқида ҳаво ва фракциялар тезликлари учун қуйидаги шартлар қабул қилинади: $\frac{\partial U(z, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial U_{pi}(z, 0, t)}{\partial r} = 0, \quad \Phi(z, 0, t) = 0$, бунда $\Phi = V, V_{pi}, W, W_{pi}$.

6 ва 7 соҳалардан чиқишда юмшоқ чегаравий шартлар қўйилган:

$$\frac{\partial^2 U(L, r, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 V(L, r, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 W(L, r, t)}{\partial z^2} = 0.$$

Оқим турбулентлигини тавсифлаш учун чизикли SARC ва SST-RC, чизикли бўлмаган SSG/LRR-RSM моделлари ишлатилди.



**2-расм. Ўлчовсиз
координаталардаги
ҳисоблаш соҳалари**

Иккинчи параграфда янги ўлчовсиз координаталарга ўтилди. Кирилган янги координаталар ҳисоблаш ишларини регуляр соҳаларда олиб бориш имконини беради (2-расм).

(z, r) координата системасидан Мизес ўзгарувчилари (ξ, η) га ўтиш диссертация ишида батафсил баён этилган.

Учинчи параграфда тенгламаларни янги ўзгарувчиларда ечишнинг сонли усули берилган. Тенгламалар системаси (4) ни сонли ечишда SIMPLE усули ишлатилган. Айни ҳолда тенгламалар тизими тезлик–босим физик ўзгарувчилар бўйича тақсимланиб ечилди. Кўчиш тенгламаларини ечиш контроль ҳажм усулида гибрид, шахмат шаклидаги

айирмали тўр тугунларида амалга оширилди.

Ушбу усулда янги координаталарда ёзилган Рейнольдс тенгламаларини ечиш икки босқични ўз ичига олади. Биринчи босқичда дастлаб оралик қийматлар $\tilde{U}, \tilde{V}$ ва W^{n+1} , сўнггра эса U^{n+1} ва V^{n+1} нинг қийматлари аниқланади:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\tilde{U} - U^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial U^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial U^n}{\partial \eta} + \frac{\partial p^n}{L \partial \xi} + \eta' \frac{\partial p^n}{\partial \eta} = \\
 & = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r v_{eff} F(z) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} \right] + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial U^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 & + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial U^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} \right) \right] - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (U - U_{p,i}), \\
 & \frac{\tilde{V} - V^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial V^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial V^n}{\partial \eta} - \frac{W^2}{r} + F(z) \frac{\partial p^n}{\partial \eta} = \\
 & = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r v_{eff} F(z) \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \eta} \right] + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial V^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 & + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial V^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{v_{eff}}{r^2} \tilde{V} - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (V - V_{p,i}), \\
 & \frac{W^{n+1} - W^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial W^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial W^n}{\partial \eta} + \frac{WV}{r} = \\
 & = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(r v_{eff} F(z) \frac{\partial W^{n+1}}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial W^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 & + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial W^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{v_{eff}}{r^2} \tilde{W} - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (W - W_{p,i}),
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{cases} U^{n+1} = \tilde{U} - \Delta t \left(\frac{\partial \delta p}{L \partial \xi} + \eta' \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} \right), \\ V^{n+1} = \tilde{V} - \Delta t F(z) \frac{\partial \delta p}{\partial \eta}. \end{cases} \quad (6)$$

(5) тенгламалар цилиндрик координаталарда янги ўзгарувчилар ёрдамида ёзилган RANS тенгламалар тизимини ифодалайди. (6) муносабатларда эса $\delta p = p^{n+1} - p^n$ – босим учун тузатма.

(6) тенгламаларни градиентга кўпайтирамиз ва вақтнинг $(n+1)$ -қадамида тезлик векторининг соленоидаллигини ҳисобга олиб, босим учун тузатманинг қийматини аниқлаш учун Пуассон тенгламасини оламиз. Ушбу тенгламани ечиш барқарор ечимга ўтиш усули билан амалга оширилди, шунинг учун у параболик тенглама кўринишида ёзиб олинди:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta p}{\partial t_0} = \Delta t \left(\frac{\partial^2 \delta p}{L^2 \partial \xi^2} + 2\eta' \frac{\partial^2 \delta p}{L \partial \xi \partial \eta} + (\eta')^2 \frac{\partial^2 \delta p}{\partial \eta^2} + \eta'' \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} \right) + \\ + \Delta t \left(F(z)^2 \frac{\partial^2 \delta p}{\partial \eta^2} + F(z) \frac{\partial \delta p}{r \partial \eta} \right) - \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} - \eta' \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} - F(z) \frac{\partial r \tilde{V}}{r \partial \eta}, \end{aligned} \quad (7)$$

бу ерда фиктив вақт t_0 итерация параметри ҳисобланади.

Тенгламалар системаси (5) даги кўчиш тенгламаларини сонли ечиш учун ярим ошкормас схема ишлатилди. Конвектив ҳадлар А.А Самарскийнинг "оқимга қарши" схемаси ёрдамида вақтнинг олдинги қадамида олинган натижалар иштирокида аппроксимацияланди:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{U}_{i,j} - U_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{0.5(U_{i,j} + |U_{i,j}|)U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{L \Delta \xi} + \frac{0.5(U_{i,j} - |U_{i,j}|)U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{L \Delta \xi} + \\ + 0.5\eta'(U_{i,j} + |U_{i,j}|) \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta \eta} + 0.5\eta'(U_{i,j} - |U_{i,j}|) \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{\Delta \eta} + \\ + 0.5F(z)^{(U)}(V_{i,j} + |V_{i,j}|) \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta \eta} + 0.5F(z)^{(U)}(V_{i,j} - |V_{i,j}|) \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{\Delta \eta} - \\ - \Pi^{(U)} = F(z)^{(U)} \frac{\tilde{U}_{i,j+1}(a_{i,j+1}^{(U)} + a_{i,j}^{(U)}) - \tilde{U}_{i,j}(a_{i,j+1}^{(U)} + 2a_{i,j}^{(U)} + a_{i,j-1}^{(U)}) + \tilde{U}_{i,j-1}(a_{i,j}^{(U)} + a_{i,j-1}^{(U)})}{2r_j \Delta \eta^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

Схема мутлақ барқарор бўлиб, унда вақтнинг янги қадамида номаълумлар фақат η йўналишида ҳайдаш усулидан фойдаланиб топилган. Қолган тенгламалар ҳам шунга ўхшаш тарзда ечилди.

Заррачалар траекторияларини ҳисоблаш учун Лагранж ёндашуви қулай. Бунинг учун системанинг 5-8-чи тенгламаларини қуйидаги шаклда ёзамиз:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dU_{pi}}{dt} &= k_i (U - U_{pi}), \quad \frac{dV_{pi}}{dt} - \frac{W_{pi}^2}{r} = k_i (V - V_{pi}), \quad \frac{dW_{pi}}{dt} - \frac{V_{pi}W_{pi}}{r} = k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{d\rho_i}{dt} &= D \left(F(z)^2 \frac{\partial^2 \rho_\rho}{\partial \eta^2} + \frac{F(z)}{r} \frac{\partial \rho_\rho}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 \rho_\rho}{L^2 \partial \xi^2} \right) + \\ &\quad + D \left(2\eta' \frac{\partial^2 \rho_\rho}{L \partial \xi \partial \eta} + (\eta')^2 \frac{\partial^2 \rho_\rho}{\partial \eta^2} + \eta'' \frac{\partial \rho_\rho}{\partial \eta} \right). \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Заррачалар траекторияларини аниқлаш учун (9) тенгламалар системасига қуйидаги тенгламаларни қўшиш керак:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dz_i}{dt} &= U_{pi}, \\ \frac{dr_i}{dt} &= V_{pi}. \end{aligned} \right.$$

(9) тенгламалардан $U_{pi}, V_{pi}, W_{pi}, \rho_i$ қийматларини сонли аниқлаш учун учун конвектив ҳадлар “оқимга қарши” схемаси асосида, диффузион ҳадлар эса (8) каби ошқормас усулда аппроксимацияланишди. Квазидаврий режим шакллангандан сўнг, ностационар майдонлар учун ўртачалаш усули амалга оширилди. Сонли натижалар 50x100 ўлчамдаги ҳисоблаш тўри учун олинди.

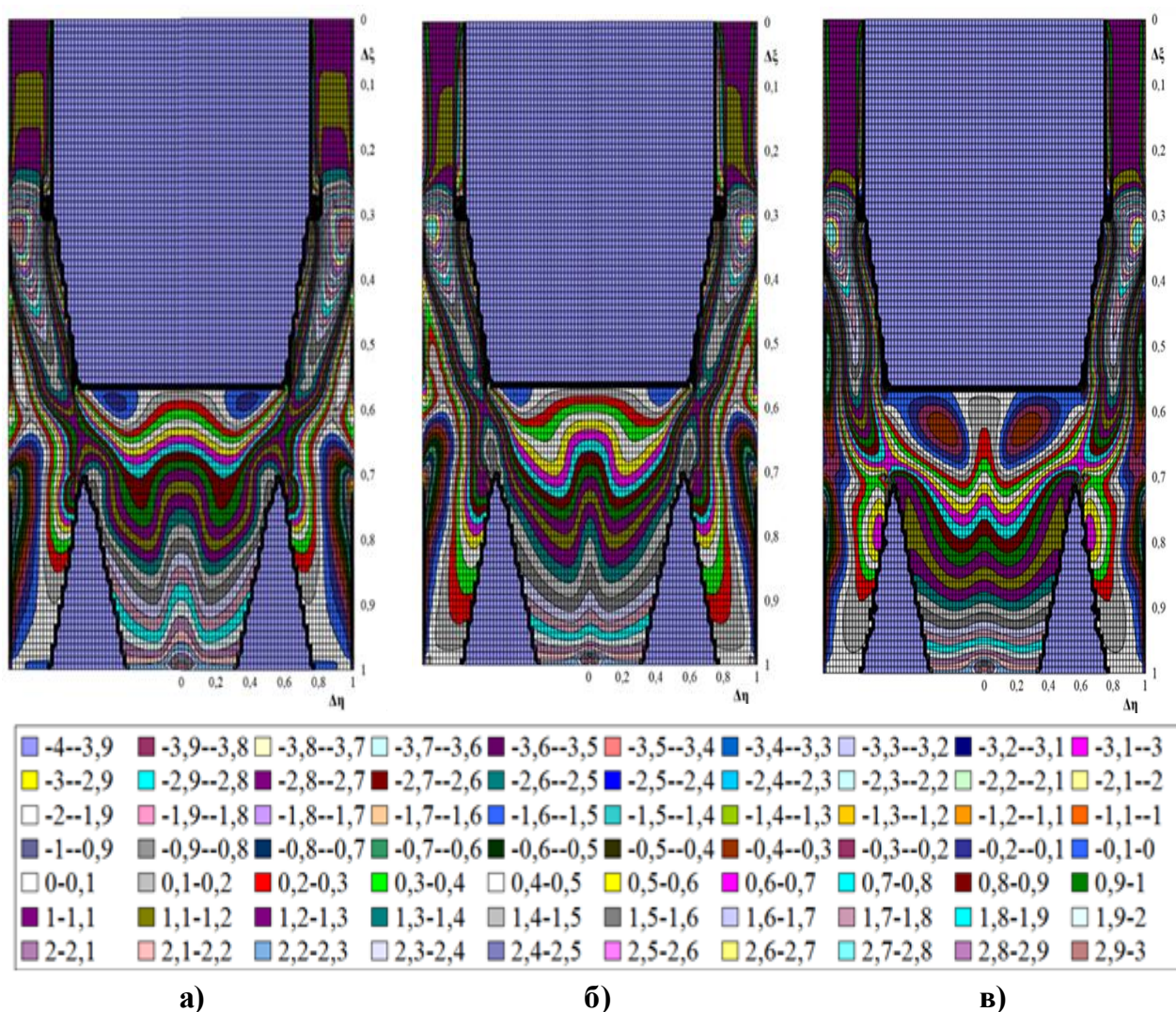
Сепараторнинг лаборатория варианты параметрлари қуйидагича (2-расм): $R=125 \text{ мм}$, $r_1=100 \text{ мм}$, $r_2=75 \text{ мм}$, $r_3=120 \text{ мм}$, $r_4=50 \text{ мм}$. Ҳисоблаш тажрибаси коаксиал каналга киришдаги оқимнинг қуйидаги параметрларида ўтказилди: $U_{\infty}=5.5 \text{ м/с}$, $V=0 \text{ м/с}$, $W_{\infty}=4.7 \text{ м/с}$, $\rho^0=7000 \text{ кг/м}^3$. Кириш қисмидаги қаттиқ фазанинг умумий зичлиги $\rho_i=18 \text{ г/см}^3$ тенг ва юза бўйича тенг тақсимланган деб олинди.

Тўртинчи параграфда турбулентликнинг чизиқли SARC ва SST-RC моделларига доир сонли натижалар таққосланди.

Бешинчи параграфда турбулентликнинг чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM модели асосида олинган натижалар келтирилган ва улар турбулентликнинг чизиқли SARC, SST-RC моделлари асосида олинган сонли натижалар билан таққосланган.

3-расмда қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсирини ҳисобга олган ҳолда турбулентликнинг чизиқли SARC ва SST-RC моделлари ва чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM модели ёрдамида олинган ҳаво бўйлама тезлигининг изолиниялари кўрсатилган.

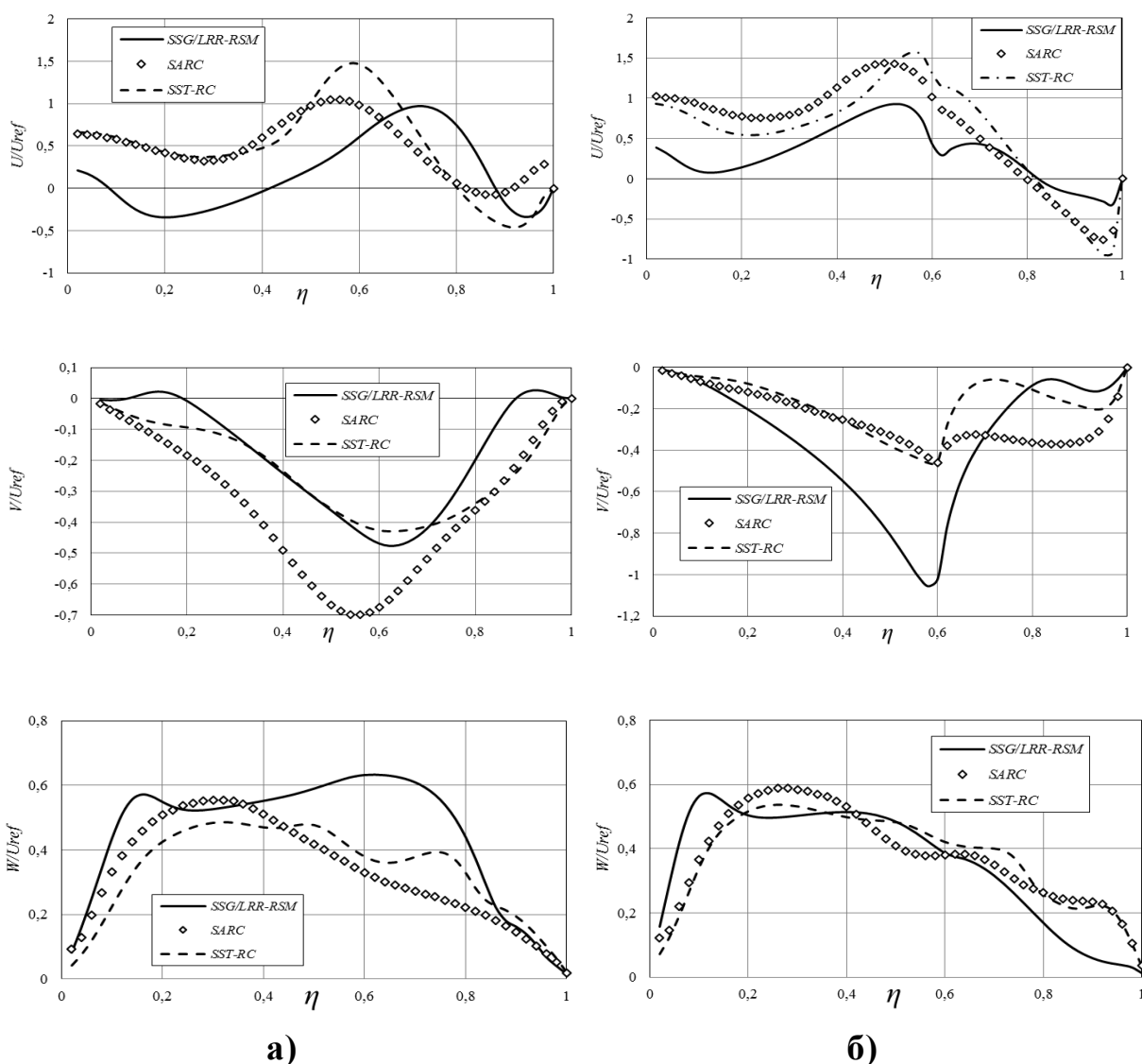
SSG/LRR-RSM турбулентлик моделидан фойдаланиш орқали (3-расм), чизиқли моделлардан фойдаланилганидан фарқли ўлароқ, ичи бўш жисмдан кейин рециркуляция соҳаларини аниқлаш мумкин бўлди. Бундан ташқари, кесилган конус ташқи девори яқинида уюмлар ҳосил бўлган.



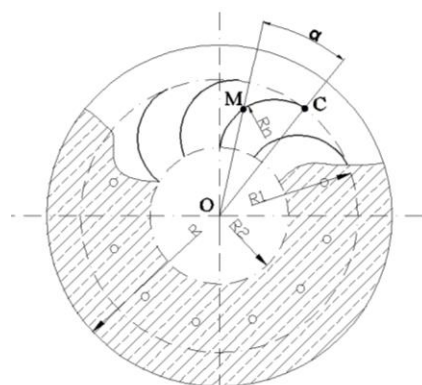
3-расм. Қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсирини ҳисобга олган ҳолда турбулентликнинг чизиқли SARC (а), SST-RC (б) ва чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM (в) моделлари ёрдамида олинган оқим бўйлама тезлигининг изолиниялари

4-расмда қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсири инобатга олинган ҳолда юқорида келтирилган турбулентлик моделлари ёрдамида ҳисобланган ҳаво тезлигининг профиллари кўрсатилган.

Сепараторнинг ишлаб чиқилган конструкциясида рух кукунининг ажратиш самарадорлиги, биринчидан, кириш оқими тезлигини ўзгартириш орқали, иккинчидан, буриш кураклари шакли ва ҳолатини ўзгартириш орқали бошқарилади. Куракларнинг ҳолати болт ўқи атрофида силлиқ ўзгартирилиши мумкин. Шунинг учун ҳисоблашларда 5-расмда келтирилган характеристик позицияга асосланамиз. Ушбу фазода бошқариладиган кураклар ёрдамида оқимга айланма ҳаракат берилади. Ушбу расмда M – куракни бириктириш ўқи, C – куракнинг R_2 радиусли цилиндр билан кесишиш нуқтаси. Бошқарувчи болт ёрдамида кураклар MOC бурчагининг α қийматига мос қилиб ўрнатилади.



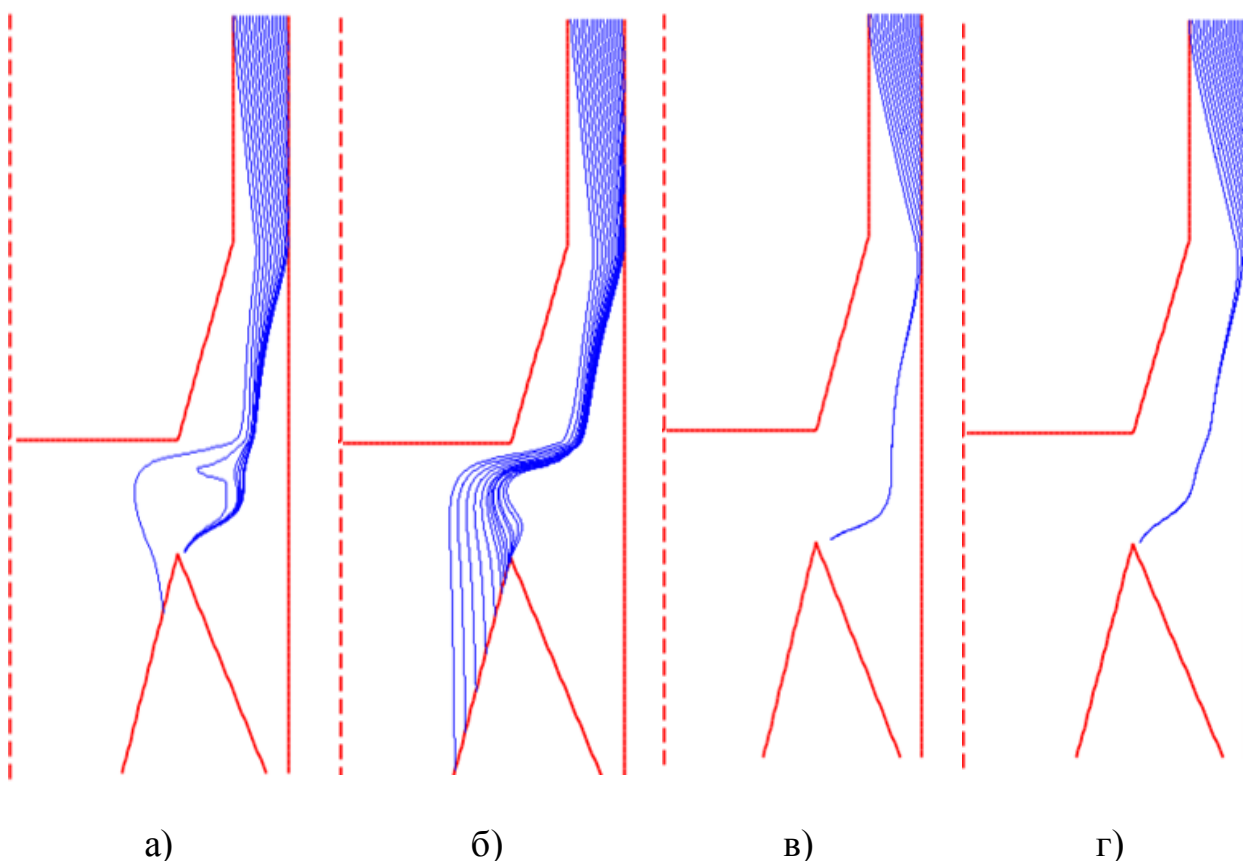
4-расм. Қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсирини ҳисобга олган ҳолда турбулентликнинг чизиқли SARC, SST-RC ва чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM моделларини қўллаб олинган ҳавонинг бўйлама, радиал ва тангенциал тезлиги профиллари.
 $\xi = 0.65$ (а), $\xi = 0.7$ (б)



5-расм. Кураклар ҳолатининг фиксацияси

Шундай қилиб, бу бурчак ҳаво оқими айланишини тартибга солувчи параметрдир. Бундан кейин айланма тезликка эришган ҳаво коаксиал каналга киради.

6-расмда диаметри $\delta = 7$ мкм ва $\delta = 10$ мкм бўлган чанг зарраларининг траекториялари кўрсатилган.



6-расм. Диаметри $\delta = 7$ мкм (а, б), $\delta = 10$ мкм (в, г) бўлган чанг зарраларининг траекториялари, $\alpha = 22^\circ$, $W/U = 0.921$. (а, в) SSG/LRR-RSM ва (б, г) SARC моделларига кўра

Расмдан кўриниб турибдики, SSG/LRR-RSM турбулентлик моделига мувофиқ диаметри $\delta=7$ мкм бўлган заррачаларнинг тахминан 27 %и, турбулентликнинг SARC моделига кўра эса 44 %и бункерда қолади. $\delta = 10$ мкм бўлган ҳолида SSG/LRR-RSM турбулент моделига мувофиқ заррачаларнинг тахминан 89 %и ва SARC турбулент моделига кўра эса 84 %и сепаратор бункерида жамланади.

Диссертациянинг учинчи боби лаборатория тажриба қурилмасини ишлаб чиқишга бағишланган.

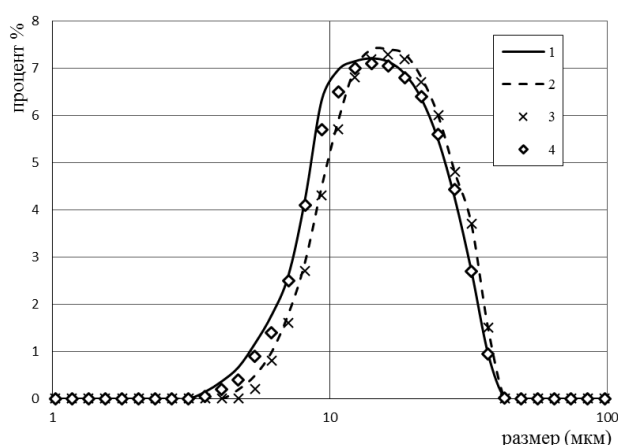
7-расмда тажриба тадқиқотлари ўтказишга мўлжалланган лаборатория сепараторининг тасвири келтирилган. Бу ерда 1 – дастлабки маҳсулотни киритиш қувури; 2 – марказдан қочма сепаратор; 3 – ушланган чангни олиб кетиш учун қувур; 4 – ҳаво чиқариладиган қисм; 5 – вентилятор; 6 – сўрувчи қувур.

8-расмда йўналтирувчи куракларнинг икки тури кўрсатилган. Биринчиси – тўғри тўртбурчак кўринишидаги, иккинчиси эса трапеция шаклидаги кийшиқ кураклар. Трапеция шаклидаги куракларнинг афзаллиги шундаки, курак зонасидан чиқишда оқим уюмалари камаяди. Иккинчи параграфда самарали айлантирувчи мослама ишлаб чиқилган.



7-расм. Кичик дисперс кукуни олиш учун лаборатория сепаратори
бўлган икки намунаси ишлатилган.

Сонли ҳисоблаш натижаларини тажриба маълумотлари билан таққослаш учун сепаратор бункеридаги, яъни марказдан қочма сепараторда ушланган чангнинг дисперсион таҳлили ўтказилди.



9-расм. Сепаратор бункеридаги ва турбулентликнинг уч модели асосида олинган натижаларга кўра чангнинг дисперс таркиби

10 мкм дан кичик бўлган чангнинг 12 %и сепаратор бункерида қолади. Бу бизнинг масаламиз учун жуда қониқарли натижа ҳисобланади.

9-расмдан кўриниб турибдики, $W_{\text{ex}}/U_{\text{ex}} = 0.851$ ва қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсири ҳисобга олинган ҳолда турбулентликнинг чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM моделининг сонли натижалари тажриба маълумотлари билан яхши мосликка эга. Қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсирини ҳисобга олган ҳолда қўлланилган чизиқли SARC модели 84 %, чизиқли SST-RC модели эса 82 % аниқликни таъминлашди.



8-расм. Йўналтирувчи кураклар шакли: а - тўртбурчакли эгри ва б - трапеция шаклидаги кураклар

Тажрибалар учун рух кукунининг заррачаларининг ўртача диаметри $\delta = 39,784$ мкм га ва $\delta = 11.063$ мкм га тенг

9-расмда $W_{\text{ex}}/U_{\text{ex}} = 0.851$ ва ҳаво тезлиги $U_{\text{ex}} = 5.5$ м/с бўлган ҳолда сепаратор бункеридан олинган рух кукунининг анализатор кўрсаткичи (ромбиклар) ва қаттиқ фазанинг ҳаво оқими динамикасига таъсири ҳисобга олинганда чизиқли бўлмаган SSG/LRR-RSM (узлуксиз чизиқ), чизиқли SARC (узук чизиқ) ва SST-RC (крестиклар) моделлари асосида олинган дисперсион таркиблар келтирилган. Тажриба натижаларига кўра, янги сепараторнинг самарадорлиги шундан иборатки, кириш тезлиги $U_{\text{ex}} = 5.5$ м/с бўлганида диаметри

ХУЛОСА

«Ҳаво сепараторлари ичида содир бўладиган жараёнларни кўп фазали муҳитлар назарияси асосида моделлаштириш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олинган натижалар асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Айланма оқимдан фойдаланадиган барча турдаги сепараторларнинг таҳлили амалга оширилди. Натижада геометрияси ва оқимнинг кириш параметрлари тўғри танланган, ҳаво оқимини сўриш орқали ҳосил қиладиган сепаратор қурилмаларининг афзалликлари исботланди.

2. Сепараторда чанг зарчасига таъсир этувчи кучлар баҳоланди ва сепаратор ичида асосий кучлар марказдан қочма ва фазалар орасидаги ўзаро таъсир кучлари эканлиги аниқланди.

3. Юқоридаги омилларини ҳисобга олган ҳолда, ўрганилаётган объектни етарли даражада тавсифловчи турбулентликнинг турли моделлари ёрдамида кўп компонентали икки фазали турбулент оқим динамикасининг математик модели ишлаб чиқилди.

4. Координаталарни алмаштириш натижасида мураккаб оқим соҳаси тўртбурчак соҳага келтирилди ва бу сонли ҳисоб-китобларни регуляр амалга оширишга имкон берди. Ташувчи газ ва дисперс қаттиқ фазаларнинг тенгламалар системаси тузилди, улар учун бошланғич ва чегаравий шартлар шакиллантирилди.

5. Марказдан қочма сепаратордаги физик жараёнларни сонли ўрганишда чизиқли (SARC, SST-RC) ва ночизиқли (SSG/LRR-RSM) турбулентлик моделларидан фойдаланиш имконини берадиган, чекли айирмалар ва SIMPLE усуллари биргаликда қўлланилган усул ишлаб чиқилди. Чизиқли бўлмаган турбулентлик модели, SSG/LRR-RSM жараёни етарли аниқликда тавсифлаши исботланди, чунки унда ҳисоблаш соҳасининг мураккаб шакли ва айланма оқим натижасида юзага келадиган анизотроп турбулентлик ҳисобга олинади.

6. Рух қуқунини турли фракцияларга ажратиш учун ҳисоблаш тажрибаси ўтказилди. Натижада қуқунни ажратишда максимал самарадорликни таъминлайдиган, ҳавони айланма ҳаракатга келтирувчи мослама куракларининг шакли, бурчаги ва киришдаги ҳаво тезлигининг оптимал кўрсаткичлари аниқланди.

7. Аниқланган оқим ва қурилманинг оптимал параметрлари юқори самарали сепараторни ишлаб чиқишга имкон берди, бу эса ажратиш самарадорлигини ишлаб чиқаришда 50% дан 70% гача ва лаборатория шароитида 70% дан 92% гача оширишга имкон берди.

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

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

МАДАЛИЕВ МУРОДИЛ ЭРКИНЖОН УГЛИ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В
ВОЗДУШНЫХ СЕПАРАТОРАХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ
МНОГОФАЗНЫХ СРЕД**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

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

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.2.PhD/FM235.

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

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tiame.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Маликов Зафар Маматкулович
доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Хужаёров Бахтиёр Хужаёрович
доктор физико-математических наук, профессор
Арифжанов Айбек Мухамеджанович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Научно-инновационный центр информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий

Защита диссертации состоится «2» декабря 2020 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33, зал заседаний-1. Тел.(99871) 262-71-52; факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмостойкости сооружений (зарегистрирована за № 2). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.(99871) 262-71-52).

Автореферат диссертации разослан «18» ноября 2020 года.
(реестр Протокола рассылки № 2 от «18» ноября 2020 года.)



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

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

И.К.Хужаев
Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На мировом уровне в настоящее время для современной промышленности большое значение имеют тонкодисперсные порошки заданного гранулометрического состава. Потому, что использование тонкодисперсных порошков во многих технологических процессах приводит к улучшению качества конечной продукции. Наиболее эффективные и экологически чистые способы получения тонкодисперсных порошков основаны на использовании центробежных воздушных сепараторов. Однако внутри центробежных сепараторов происходят сложные нестационарные режимы турбулентного течения. Экспериментальные исследования в этом направлении связаны с большими техническими трудностями и высокой себестоимостью. Поэтому совершенствование и технологическое развитие воздушной обработки многофазных сред и создание более совершенных новых и эффективных сепараторов для разделения порошков по фракциям может осуществляться только на основе фундаментальных исследований в области аэродинамики многофазных потоков.

В настоящее время в мире разрабатываются различные математические модели турбулентности, описывающие закрученное движение среды, также развивается их применение для решения различных гидродинамических задач. Закручивание потока вызывает сильную анизотропную турбулентность. Математически эта проблема очень сложна и до сих пор не создана универсальная математическая модель для закрученного турбулентного потока. Эта проблема еще больше усложняется для двухфазного полидисперсного турбулентного потока. В связи с этим необходимо разработать улучшенные математические модели, эффективные вычислительные алгоритмы и программы расчета закрученных двухфазных турбулентных потоков.

В нашей стране большое внимание уделяется локализации средств производства и производству материалов. В частности, эффективные центробежные сепараторы спроектированы и внедрены в производственные объекты, работающие в средах с различными дисперсиями. В то же время в Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы отмечены: «... производство ..., техническое и технологическое обновление ..., дальнейшая модернизация и диверсификация отрасли путем перехода к высоко технологической переработке местного сырья с высокой добавленной стоимостью, ... сокращение потребления энергии и ресурсов в экономике, внедрение энергосберегающих технологий»¹. При реализации этих задач важное значение имеет разработка пакетов программ, которые позволяют моделировать закрученные турбулентные полидисперсные потоки,

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

проводить вычислительные эксперименты и определить рациональные параметры различных устройств.

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

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

Степень изученности проблемы. Несмотря на множества различных конструкций центробежных сепараторов, используемых в промышленности, проблема разделения мелкой пыли еще далека от своего решения. Например, на сегодняшний день самый эффективный центробежный сепаратор производится фирмой «Cemtec Cement and Mining GmbH». Однако эффективность этого воздушного сепаратора не превышает уровня 70–75 %. Учитывая то, что конструкции выпускаемых сепараторов ведущих мировых производителей очень похожи, можно утверждать, что эти аппараты достигли своего временного совершенства. А увеличение эффективности разделения на каждый процент может привести существенную экономическую выгоду. Чтобы увеличить эффективность сепаратора надо изучить динамику вращающихся многофазных сред на основе законов гидродинамики и создать адекватную математическую модель закрученных турбулентных потоков.

В настоящее время математическое моделирование процессов в закрученных турбулентных потоках, разработка эффективных методов и алгоритмов численного решения соответствующих задач являются приоритетными научными направлениями современной гидромеханики.

Х.А. Рахматуллин открыл дополнительную силу при изменении фазовых концентраций и на основе этого усовершенствовал классическую модель многофазных потоков в 1956 году. Классическую математическую модель многофазного потока можно встретить в научных работах А. Фортье (1971) и Р. Бусройда (1975). В Вычислительном Центре Российской Академии Наук О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов для исследования сложных аэродинамических потоках разработали эффективные численные методы и проводили обширные вычислительные эксперименты (1973). В своем исследовании Р.И. Нигматулин учел взаимодействие частиц твердой и жидкой фаз (1987). Научные работы Спаларта П.Р., Аллмараса С.Р. (1992), Шура М.Л. (1997), Ментера Ф.Р. (1994), Секундова А.Н (1995), Вилкокса Д.С (2006) посвящены разработке и улучшению линейной модели турбулентности на основе гипотезы Буссинеска. Лаундер Б.Е. (1972), Роди В.

(1975), Хеллистен А., Валлин С., Йохансон А.В. (2005) разработали нелинейные модели турбулентности.

Имеют большую заслугу в разработке теории многофазного течения в Узбекистане Д.Ф. Файзуллаев, А.И. Умаров, К.Ш. Латипов, И.Н. Хусанов, А.А. Хамидов, А.А. Шокиров, А.М. Арифжанов, З.М. Маликов и другие. Несмотря на проведенные многочисленные исследования в области гидромеханики, на сегодняшний день отсутствуют математические модели, которые адекватно описывают турбулентное течение многофазных полидисперсных сред в условиях центробежного сепарирования.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ. Диссертационное исследование проведено при выполнении хозяйственной договорной работы № 02-1061 ЮР «Разработка и внедрение технологии разделения цинкового порошка, выпускаемого на цинковом заводе АО «Алмалыкский ГМК» и согласно «Дорожной карты» по обеспечению коммерциализации разработок Института механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан на Цинковом заводе АО «Алмалыкский ГМК» и проведении опытно-промышленного испытания модернизированной форсунки для распыления цинкового порошка.

Целью исследования является определение оптимальных параметров конструкции центробежного сепаратора путем применения математической модели турбулентных течений двухфазных полидисперсных сред.

Задачи исследования:

анализ конструкций сепараторов для сухого разделения тонкодисперсных порошков;

проведение сравнительной оценки силовых факторов в двухфазной среде на основе обзора литературы;

разработка математической модели закрученного турбулентного потока газа с твердыми полидисперсными частицами в центробежном сепараторе;

численное моделирование двухфазного закрученного турбулентного потока с привлечением различных моделей турбулентности;

определение наиболее подходящей модели турбулентности для закрученного потока с твердыми включениями;

разработка метода определения эффективности сепаратора.

Объектом исследования являются центробежные сепараторы, которые широко используются в промышленности.

Предметом исследования является математическая модель закрученных двухфазных турбулентных потоков внутри центробежного сепаратора.

Методы исследования. При выполнении исследований использованы методы математического моделирования двухфазных течений на основе нелинейных уравнений гидромеханики и вычислительного эксперимента, лабораторное тестирование эффективности разработанного сепаратора с использованием электронных микровесов, современного анемометра, микроскопа и других измерительных приборов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

впервые сформулирована математическая задача двухфазного закрученного потока в сепараторе с использованием нелинейной модели турбулентности Рейнольдсовых напряжений RSM с учетом межфазного взаимодействия и доказана ее преимущество по адекватности относительно других моделей;

разработан метод численного решения системы уравнений Рейнольдса в новых переменных на основе нелинейной модели турбулентности;

разработаны методики и программа расчета оптимальных параметров вспомогательных элементов нового разработанного центробежного сепаратора;

для отделения порошка создан высокоэффективный центробежный сепаратор на основе разработанных лопастей трапецевидной формы.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

разработана эффективная модель двухфазного турбулентного потока;

разработан пакет программ для изучения одно- и двухфазных турбулентных потоков;

определены оптимальные параметры лопаток завихрителя потока, которые позволили увеличить эффективность сепаратора с 89% до 92%;

определена оптимальная скорость потока на входе в сепаратор.

Все эти результаты теоретических исследований позволили сконструировать сепаратор для промышленности с эффективностью более 70%. Нового созданного центробежного сепаратора можно использовать как пылеуловитель.

Достоверность полученных результатов. Полученные теоретические и численные результаты сравнивались с опытными замерами, которые проводились в лабораторных условиях. Показано, что их разница не превышает 5%.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что впервые для расчета параметров центробежных сепараторов использованы результаты исследования двухфазного турбулентного потока, полученные из строгих основ аэродинамики. До этого использовались в основном эмпирические методы расчета, которые не раскрывали физическую суть различных процессов, происходящие внутри сепаратора.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предложена методика численного расчёта сепаратора с использованием полуэмпирической модели турбулентности. Результаты диссертации полезны не только для разработки сепараторов, но и для конструирования эффективных пылеуловителей, гидроциклонов, смесителей и т.д.

Внедрение результатов исследования. По результатам исследования турбулентных течений двухфазных полидисперсных сред в центробежном сепараторе:

оптимальные параметры конструкции центробежного сепаратора внедрены при производстве сепаратора цинкового порошка для

Алмалыкского горно-металлургического комбината (справка ОАО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» от 21 февраля 2020 года № АС-01441). В результате удалось разделить порошок цинка ПЦ-4 со средним размером 7 мкм (ГОСТ 12601-76);

По результатам исследования аэродинамики процесса внутри сепаратора найдены рациональные параметры устройства (справка ОАО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» № АС-01441 от 21 февраля 2020 г.). В результате показатель К.П.Д. сепаратора цинкового порошка был увеличен с 50% до 70% в процессе производства.

Апробация работы. Результаты исследования обсуждались на 2 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По теме исследования опубликовано 18 научных трудов. Из них 9 научных статей, в том числе 5 – в республиканских и 4 – в зарубежном журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, а также получены 3 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ, подана заявка на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 101 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Первая глава диссертации озаглавлена **«Математическое моделирование процессов, происходящих внутри сепаратора»**.

В первом параграфе рассмотрено основное оборудование для разделения тонкодисперсных порошков в промышленности производства строительных материалов.

Во втором параграфе проводится анализ сил, действующих на твердую частицу аэрозоли, возникающие в закрученном турбулентном потоке. Произведена оценка величин этих сил.

В третьем параграфе обсуждаются основные подходы к моделированию турбулентности.

В четвертом параграфе описаны некоторые линейные модели турбулентности.

Модель Спаларта-Аллмараса относится к классу однопараметрических моделей турбулентности. Здесь появляется только одно дополнительное уравнение для расчета кинематического коэффициента вихревой вязкости:

$$\frac{d\tilde{\nu}}{dt} = C_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu} - \left[C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{k^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{\nabla[(v + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}]}{\sigma_v} + \frac{C_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2}{\sigma_v}. \quad (1)$$

Турбулентная вихревая вязкость вычисляется по формуле: $\nu_t = \tilde{\nu}f_{v1}$.

Модель Ментера SST записывается путем суперпозиции моделей k - ε и k - ω . Плавный переход от k - ω модели в пристеночной области к k - ε модели вдали от твердых стенок обеспечивается введением весовой эмпирической функции F_1 :

$$\begin{cases} \frac{dk}{dt} = \nabla[(\mu + \sigma_k\mu_t)\nabla k] + Pf_{rot} - \beta^*\omega k, \\ \frac{d\omega}{dt} = \nabla[(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega] + \frac{\gamma}{\nu_t}Pf_{rot} - \beta\omega^2 + 2(1 - F_1)\frac{\sigma_{\omega^2}}{\omega}\nabla\omega\nabla k. \end{cases} \quad (2)$$

Турбулентная вязкость вычисляется по формуле: $\nu = k / \omega$.

В пятом параграфе обсуждены нелинейные модели турбулентности Рейнольдсовых напряжений. Модели напряжений Рейнольдса с полным вторым моментом сильно отличаются от более простых линейных и нелинейных моделей с одним уравнением, так как последние используют конститутивное соотношение, дающее напряжения Рейнольдса τ_{ij} в терминах других тензоров через некоторое предполагаемое соотношение (такое как гипотеза Буссинеска). С другой стороны, полные модели напряжений Рейнольдса второго момента вычисляют каждое из 6 напряжений Рейнольдса напрямую (тензор напряжений Рейнольдса симметричен, поэтому имеется 6 независимых членов). Каждое напряжение Рейнольдса имеет свое собственное уравнение переноса. Существует также седьмое уравнение переноса для переменной, определяющее масштаб. Полная модель напряжений Рейнольдса SSG/LRR- ω и уравнение масштаба длины определяются в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial U_k R_{ij}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} + D_{ij}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial U_k \omega}{\partial x_k} = \frac{a_\omega \omega}{k} \frac{P_{kk}}{2} - B_\omega \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu + \sigma_\omega \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \right) + \sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\rho R_{ij} = -\tau_{ij} = \rho u'_i u'_j$; P_{ij} – генерация Рейнольдсовых напряжений; D_{ij} – диффузия; ε_{ij} – диссипация; Π_{ij} – член перераспределения давления.

Второй глава диссертации озаглавлен «**Численное исследование центробежного сепаратора**».

В первом параграфе формулированы физическая и математическая постановки задачи.

На рис. 1 представлен осевой разрез новой разработанной конструкции центробежного сепаратора (заявка на патент IAP 69152).

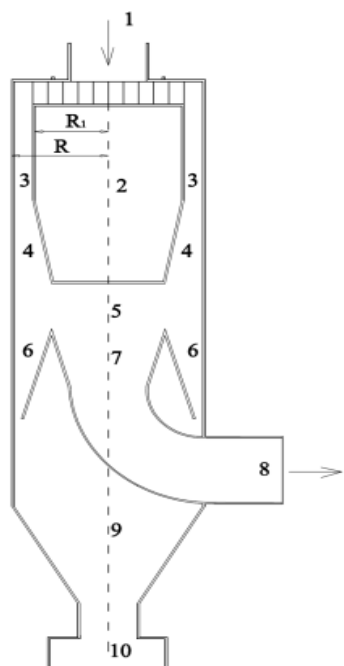


Рис. 1. Вид осевого разреза новой конструкции сепаратора

Воздушный поток с твердыми частицами вводится через входной патрубок 1. Перед потоком стоит полое тело в форме цилиндра, который оканчивается на усеченном конусе. Во входной части этого тела установлены направляющие потока в виде спиральных поверхностей. Они образуют вращательную скорость. Поток с частицами устремляется к внешней границе с радиусом R и попадает в цилиндрическую щель 3 с внутренним радиусом R_1 .

После обтекания полого тела 2 поток перестраивается и с помощью клина цилиндрической формы разделяется на части 6 и 7. Благодаря центробежной силе, основная масса, состоящая из более тяжелых частиц, попадает в наружный поток 6. Более легкие частицы воздушным потоком 7 выводятся через выходной патрубок 8. Оказавшиеся в сужающей цилиндрической щели 6 более тяжелые частицы попадают в зону покоя 9. Двигаясь под воздействием силы гравитации, они накапливаются в бункере 10.

Движение двухфазной многокомпонентной среды описываем в цилиндрических координатах (z, r) . Ось z начинается из центра верхней части полого тела и направлена вниз. Радиальная координата r начинается с оси z и направлена наружу. Осевую, радиальную и тангенциальную составляющих вектора скорости воздуха обозначим через U , V и W , а частиц i -й фракции – через U_{pi} , V_{pi} и W_{pi} . Считаем, что поток осесимметричный. Соответственно, в область расчета входят зоны 3, 4, 5, 6 и 7 (сужающийся конус для очищенного воздуха). Область 9, как уже отметили выше, представляет зону покоя. Колено и выходной патрубок не входят в область расчета. Полагаем, что поток турбулентный. Считаем, что наличие частиц не приводит к ощутимому изменению плотности среды ρ . Частицы представлены N фракциями с одинаковой истинной плотности ρ_p с эффективными диаметрами δ_i . С учетом уравнения сохранения i -й фракции система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (U - U_{pi}), \\ \frac{dV}{dt} - \frac{W^2}{r} + \frac{\partial p}{\rho \partial r} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \frac{v_{eff}}{r^2} V - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (V - V_{pi}), \\ \frac{dW}{dt} - \frac{VW}{r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_{eff} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{v_{eff}}{r^2} W - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{dU_{pi}}{dt} &= k_i (U - U_{pi}), \quad \frac{dV_{pi}}{dt} - \frac{W_{pi}^2}{r} = k_i (V - V_{pi}), \quad \frac{dW_{pi}}{dt} - \frac{V_{pi} W_{pi}}{r} = k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{d\rho_i}{dt} &= D \left(\frac{\partial^2 \rho_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial z^2} \right), \quad D = \frac{\rho}{\rho + \rho_\rho} \frac{\nu + \nu_t}{Sc}, \quad \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial r V}{r \partial r} = 0, \\ i &= 1..N, \quad v_{eff} = \nu + \nu_t. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Здесь p – давление; ν, ν_t – коэффициенты ламинарной и турбулентной кинематической вязкости воздуха; $k_i = \frac{18\rho\nu}{\rho_i \delta_i^2}$ – параметр Стокса для i -й

фракции; $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial z} + V \frac{\partial}{\partial r}$ – субстанциональная производная; D – коэффициент диффузии для твердой фазы; $Sc = 0.8$ – число Шмидта.

На входе, при $z = 0$, заданы граничные условия:

$$U(0, r, t) = U_{pi}(0, r, t) = U_{\infty}, \quad V(0, r, t) = 0, \quad W(0, r, t) = W_{pi}(0, r, t) = W_{\infty}, \quad \frac{\partial p(0, r, t)}{\partial r} = \frac{\rho W^2}{r}.$$

На стенках – условия прилипания: $\Phi(z, R, t) = 0$, здесь $\Phi = U, V, W,$

$$U_{pi}, V_{pi}, W_{pi}.$$

На оси струи для вектора скорости воздуха и фракций принимаются условия: $\frac{\partial U(z, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial U_{pi}(z, 0, t)}{\partial r} = 0, \quad \Phi(z, 0, t) = 0$ при $\Phi = V, V_{pi}, W, W_{pi}$.

На выходе из подобластей 6 и 7 реализованы мягкие граничные условия

$$\frac{\partial^2 U(L, r, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 V(L, r, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 W(L, r, t)}{\partial z^2} = 0.$$

Для описания турбулентных характеристик потока использованы линейные модели SARC и SST-RC, а также нелинейная модель SSG/LRR-RSM.

Во втором параграфе представлен переход к новым безразмерным координатам. Введены новые координаты, которые позволяют перейти в регулярные подобласти расчета (рис. 2).

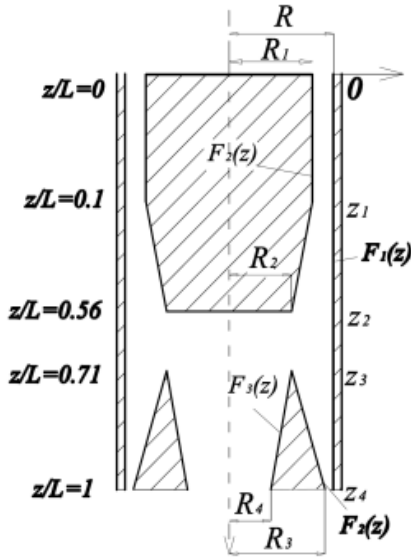


Рис. 2. Области расчета в безразмерных координатах

Переход от (z, r) к переменным Мизеса (ξ, η) , где $\xi = z/L$, подробно представлен в диссертационной работе.

В третьем параграфе представлен численный метод решения уравнений в новых переменных. При численном решении системы уравнений (4) использовали метод SIMPLE. При этом система уравнений решалась в физических переменных скорость–давление с физическим расщеплением полей скорости и давления. Численное решение уравнений переноса проводилось на гибридной, шахматной разностной сетке методом контрольного объема.

Согласно этому методу, решение уравнений Рейнольдса, записанных в новых координатах, включает два этапа.

В первом этапе сначала определяются промежуточные значения $\tilde{U}$, $\tilde{V}$ и W^{n+1} , а затем, U^{n+1} и V^{n+1} :

$$\begin{cases}
 \frac{\tilde{U} - U^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial U^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial U^n}{\partial \eta} + \frac{\partial p^n}{L \partial \xi} + \eta' \frac{\partial p^n}{\partial \eta} = \\
 = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r v_{eff} F(z) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} \right] + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial U^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial U^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial U^n}{\partial \eta} \right) \right] - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (U - U_{p,i}), \\
 \frac{\tilde{V} - V^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial V^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial V^n}{\partial \eta} - \frac{W^2}{r} + F(z) \frac{\partial p^n}{\partial \eta} = \\
 = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r v_{eff} F(z) \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \eta} \right] + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial V^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial V^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial V^n}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{v_{eff}}{r^2} \tilde{V} - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (V - V_{p,i}), \\
 \frac{W^{n+1} - W^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial W^n}{L \partial \xi} + U^n \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} + V^n F(z) \frac{\partial W^n}{\partial \eta} + \frac{WV}{r} = \\
 = \frac{F(z)}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(r v_{eff} F(z) \frac{\partial W^{n+1}}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial W^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} \right) \right] + \\
 + \eta' \frac{\partial}{\partial \eta} \left[v_{eff} \left(\frac{1}{L} \frac{\partial W^n}{\partial \xi} + \eta' \frac{\partial W^n}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{v_{eff}}{r^2} \tilde{W} - \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} k_i (W - W_{p,i}),
 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U^{n+1} = \tilde{U} - \Delta t \left(\frac{\partial \delta p}{L \partial \xi} + \eta' \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} \right), \\ V^{n+1} = \tilde{V} - \Delta t F(z) \frac{\partial \delta p}{\partial \eta}. \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения (5) представляют собой систему уравнений RANS, записанную в цилиндрической координате в новых переменных. В зависимостях (6) выражение $\delta p = p^{n+1} - p^n$ – поправка к давлению.

Умножая уравнение (6) на градиент и учитывая соленоидальность вектора скорости на $(n+1)$ -м временном слое, получаем уравнение Пуассона для определения поправки к давлению. Решение данного уравнения проводился методом установления, поэтому записывается в виде параболического уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta p}{\partial t_0} = \Delta t \left(\frac{\partial^2 \delta p}{L^2 \partial \xi^2} + 2\eta' \frac{\partial^2 \delta p}{L \partial \xi \partial \eta} + (\eta')^2 \frac{\partial^2 \delta p}{\partial \eta^2} + \eta'' \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} \right) + \\ + \Delta t \left(F(z)^2 \frac{\partial^2 \delta p}{\partial \eta^2} + F(z) \frac{\partial \delta p}{r \partial \eta} \right) - \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} - \eta' \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} - F(z) \frac{\partial r \tilde{V}}{r \partial \eta}, \end{aligned} \quad (7)$$

где фиктивное время t_0 является итерационным параметром.

Для численного решения уравнений переноса из системы (5) использована полунейная конечноразностная схема. Конвективные члены аппроксимировали по схеме «против потока» А.А. Самарского с участием неизвестных из предыдущего временного слоя:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{U}_{i,j} - U_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{0.5(U_{i,j} + |U_{i,j}|)U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{L \Delta \xi} + \frac{0.5(U_{i,j} - |U_{i,j}|)U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{L \Delta \xi} + \\ + 0.5\eta'(U_{i,j} + |U_{i,j}|) \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta \eta} + 0.5\eta'(U_{i,j} - |U_{i,j}|) \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{\Delta \eta} + \\ + 0.5F(z)^{(U)}(V_{i,j} + |V_{i,j}|) \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta \eta} + 0.5F(z)^{(U)}(V_{i,j} - |V_{i,j}|) \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{\Delta \eta} - \\ - \Pi^{(U)} = F(z)^{(U)} \frac{\tilde{U}_{i,j+1}(a_{i,j+1}^{(U)} + a_{i,j}^{(U)}) - \tilde{U}_{i,j}(a_{i,j+1}^{(U)} + 2a_{i,j}^{(U)} + a_{i,j-1}^{(U)}) + \tilde{U}_{i,j-1}(a_{i,j}^{(U)} + a_{i,j-1}^{(U)})}{2r_j \Delta \eta^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Схема является абсолютно устойчивой и неизвестные на новом временном слое находили методом прогонки только по η . Остальные уравнения тоже решены аналогичным образом.

Для расчета траекторий частиц удобным является подход Лагранжа. Для этой цели 5-8 – е уравнения в системе (4) запишем в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dU_{pi}}{dt} &= k_i (U - U_{pi}), \quad \frac{dV_{pi}}{dt} - \frac{W_{pi}^2}{r} = k_i (V - V_{pi}), \quad \frac{dW_{pi}}{dt} - \frac{V_{pi}W_{pi}}{r} = k_i (W - W_{pi}), \\ \frac{d\rho_i}{dt} &= D \left(F(z)^2 \frac{\partial^2 \rho_\rho}{\partial \eta^2} + \frac{F(z)}{r} \frac{\partial \rho_\rho}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 \rho_\rho}{L^2 \partial \xi^2} \right) + \\ &\quad + D \left(2\eta' \frac{\partial^2 \rho_\rho}{L \partial \xi \partial \eta} + (\eta')^2 \frac{\partial^2 \rho_\rho}{\partial \eta^2} + \eta'' \frac{\partial \rho_\rho}{\partial \eta} \right). \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Для поиска траекторий частиц необходимо к системе (9) добавить еще следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dz_i}{dt} &= U_{pi}, \\ \frac{dr_i}{dt} &= V_{pi}. \end{aligned} \right.$$

Для численного нахождения $U_{pi}, V_{pi}, W_{pi}, \rho_i$ из уравнений (9) для конвективного члена использована схема «против потока», а для диффузионного члена – неявный метод, аналогичный (8). После формирования квазипериодического режима проводилось усреднение нестационарных полей. Численные результаты получены для расчетной сетки 50x100.

Параметры лабораторной установки сепаратора имели значения: $R = 125 \text{ мм}$, $r_1 = 100 \text{ мм}$, $r_2 = 75 \text{ мм}$, $r_3 = 120 \text{ мм}$, $r_4 = 50 \text{ мм}$ (рис. 2). Вычислительный эксперимент проводился при следующих значениях параметров потока на входе в коаксиальный канал: $U_{вх} = 5.5 \text{ м/с}$, $V = 0 \text{ м/с}$, $W_{вх} = 4.7 \text{ м/с}$, $\rho^0 = 7000 \text{ кг/м}^3$. Суммарная плотность твердой фазы на входе составила $\rho_i = 18 \text{ г/м}^3$, которая распределена по сечению однородно.

В четвёртом параграфе проведены сравнения численных результатов линейных моделей турбулентности SARC и SST-RC.

В пятом параграфе представлены численные результаты на основе нелинейной модели турбулентности SSG/LRR-RSM, которые сравнены с результатами линейных моделей турбулентности SARC и SST-RC.

На рис. 3 представлены изолинии продольной скорости воздуха, полученные по линейным моделями турбулентности SARC и SST-RC и нелинейной модели турбулентности SSG/LRR-RSM с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока.

При использовании модели турбулентности SSG/LRR-RSM (рис. 3), в отличие от использования линейных моделей, удалось выделить зон рециркуляции после полого тела. Кроме того, в зоне с усеченным конусом образуются вихри около внешней стенки.

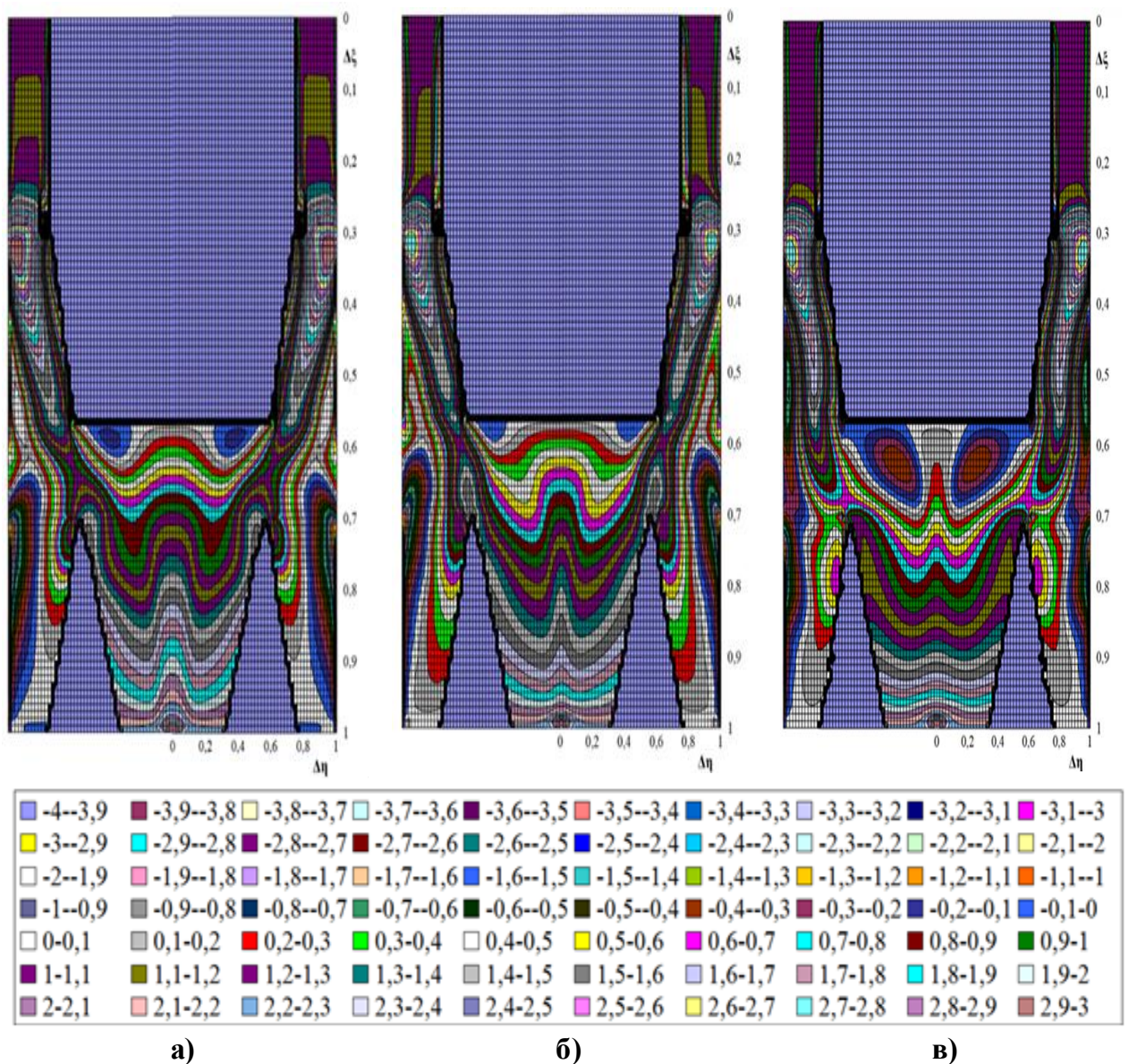


Рис. 3. Изолинии продольной скорости потока, полученные с использованием линейных моделей турбулентности SARC (а), SST-RC (б) и нелинейной модели SSG/LRR-RSM (в) с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока

На рис. 4 представлены профили скоростей воздуха, которые получены с применением перечисленных выше моделей турбулентности в различных сечениях с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока.

В разработанной конструкции сепаратора эффективность разделения цинкового порошка регулируется, во-первых, изменением скорости входного потока и, во-вторых, изменением положения фиксации лопаток закрутки.

Положения лопаток можно плавно изменить вокруг оси вращения. Поэтому для проведения численного расчета берем характерное положение, которое представлено на рис. 5. С помощью управляемых лопаток потоку передается вращательное движение. На рисунке M – ось крепления лопатки, C – точка пересечения лопатки с цилиндром R_2 . С помощью регулирующих болтов лопатки фиксируются так, чтобы значение угла MOC было равно α .

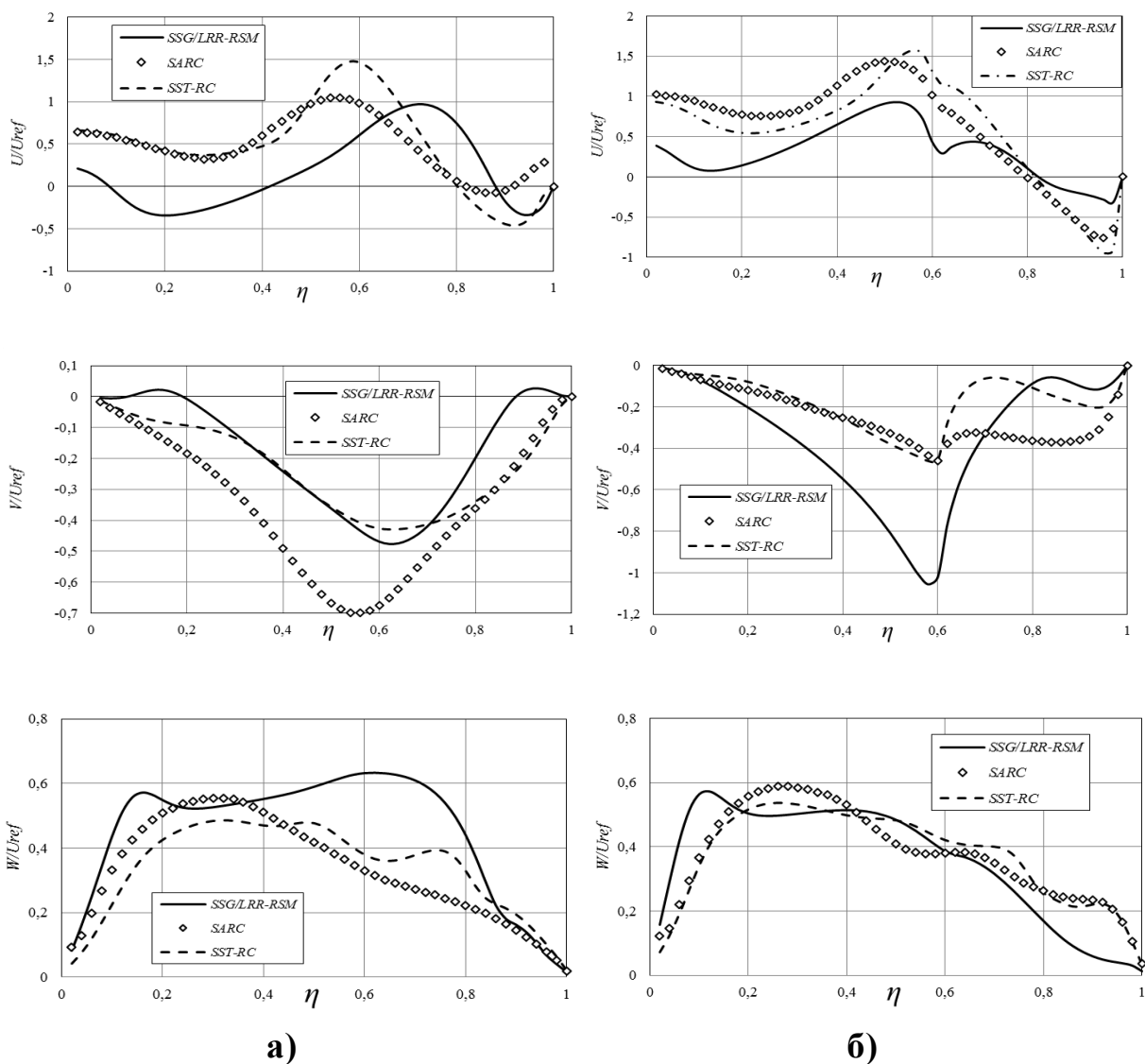


Рис. 4. Профили аксиальной, радиальной и тангенциальной скоростей потока воздуха, полученные при использовании линейных моделей турбулентности SARC, SST-RC и нелинейной модели турбулентности SSG/LRR-RSM с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока в сечениях. $\xi=0.65$ (а), $\xi=0.7$ (б)

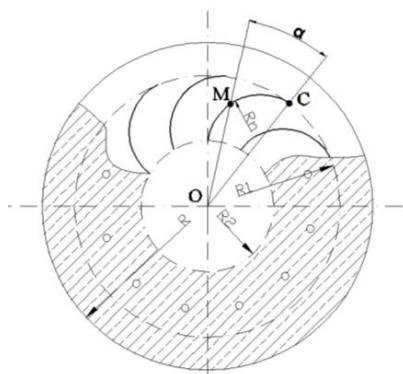


Рис. 5. Положение фиксации лопатки

Таким образом, данный угол является регулирующим параметром для закрутки потока воздуха. Далее воздух, приобретая вращательную скорость, входит в коаксиальный канал.

На рис. 6 представлены траектории пылевых частиц с диаметрами $\delta = 7 \text{ мкм}$ и $\delta = 10 \text{ мкм}$.

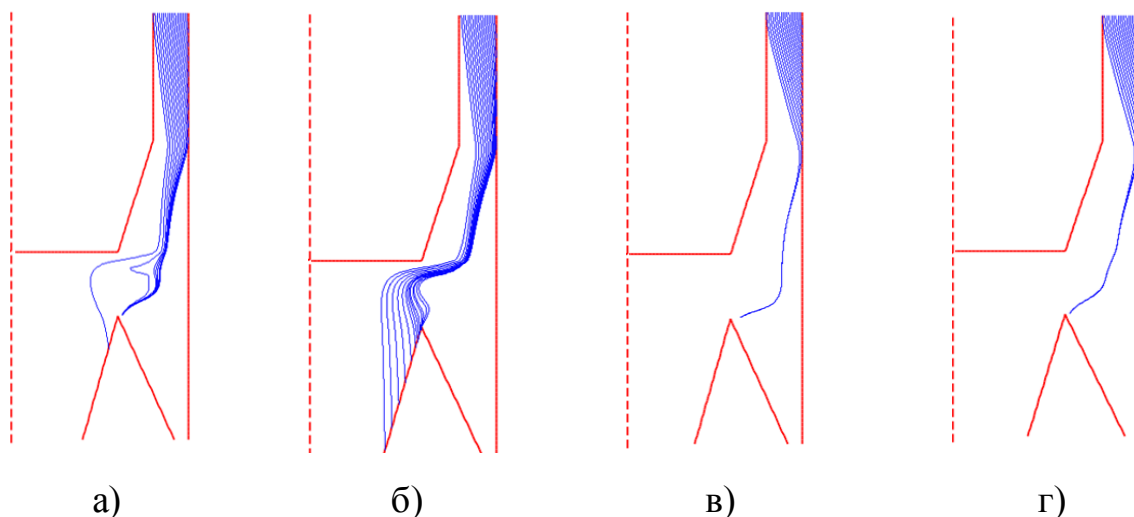


Рис. 6. Траектории пылевых частиц с диаметрами $\delta=7$ мкм (а, б), $\delta=10$ мкм (в, г), при $\alpha=22^\circ$, $W/U=0.921$, по модели SSG/LRR-RSM (а, в) и SARC (б, г)

Как видно из рисунка, примерно 27 % частиц с диаметром $\delta=7$ мкм оказались в бункере по модели турбулентности SSG/LRR-RSM и 44 % – по модели турбулентности SARC. Для варианта с $\delta=10$ мкм примерно 89 % частиц по модели турбулентности SSG/LRR-RSM и 84 % частиц по модели турбулентности SARC попадают в бункер сепаратора.

Третий глава диссертационной работы посвящен разработке лабораторной установки.

На рис. 7 представлена фотография лабораторного сепаратора, предназначенного для проведения экспериментальных исследований.



Рис. 7. Лабораторный сепаратор для получения тонкодисперсных порошков

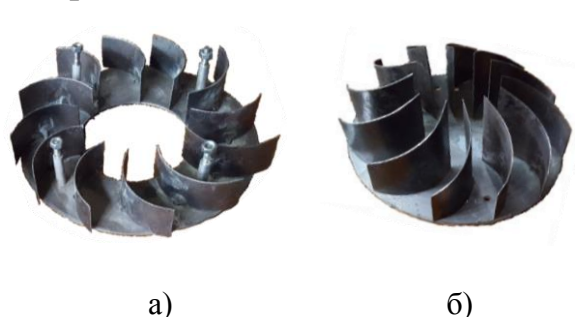


Рис. 8. Формы, направляющих потока: искривленный прямоугольный лопаток (а) и лопаток в виде трапеции (б)

Здесь 1 – патрубок подачи исходного материала; 2 – центробежный сепаратор; 3 – патрубок для выгрузки уловленного порошка; 4 – вытяжка вентилятора; 5 – вентилятор; 6 – всасывающий патрубок.

На рис. 8 представлены направляющие лопасти два типа. Первый – это обычная прямоугольная искривленная лопасть, а второй – в виде трапеции. Преимущество трапециодального вида лопат заключается в том, что при

выходе из зоны лопаток возмущения потока будут снижаться. Во втором параграфе разработано эффективное закручивающее устройство. Для проведения экспериментов использовали два вида порошка цинка средним гранулометрическим составом: $\delta=39.784$ мкм и $\delta=11.063$ мкм.

Для сопоставления результатов численного расчета с опытными данными проведен дисперсный анализ пыли из бункера сепаратора, т.е. улавленной центробежным сепаратором пыли.

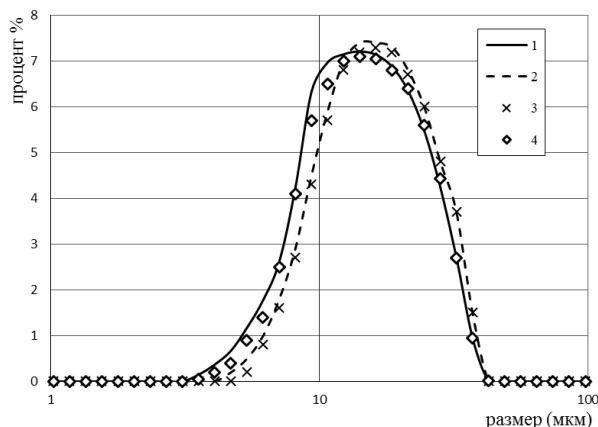


Рис. 9. Дисперсионный состав пыли из бункера сепаратора и по результатам трех моделей турбулентности

На рис. 9 представлен дисперсионный состав пыли из бункера сепаратора по анализатору (ромбики) и согласно результатам численного расчета по нелинейной модели SSG/LRR-RSM (сплошная линия), линейным моделям SARC (пунктирная линия) и SST-RC (крестики) с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока при $U_{\text{вх}} = 5.5 \text{ м/с}$ и $W_{\text{вх}}/U_{\text{вх}} = 0.851$. Согласно результатам эксперимента, эффективность нового сепаратора выражается тем,

что при входной скорости $U_{\text{вх}} = 5.5 \text{ м/с}$ 12% пыли с диаметром меньше 10 мкм остаётся в бункере сепаратора. Это весьма удовлетворительное решение нашей задачи.

Из рис. 9 видно, что при $W_{\text{вх}}/U_{\text{вх}} = 0.851$ численные результаты по нелинейной модели турбулентности SSG/LRR-RSM с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока показывают хорошее согласие с экспериментальными данными. При использовании линейной модели SARC с учетом влияния твердой фазы на динамику воздушного потока достигнута точность 84 %, а при использовании SST-RC – 82 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, полученных по диссертационной работе «Моделирование процессов, происходящих в воздушных сепараторах на основе теории многофазных сред», представлены следующие выводы:

1. Проведен анализ всех типов сепараторов, в которых используется закрученный поток. В результате доказано преимущество устройств, в которых поток воздуха создается за счет всасывания при надлежащем выборе геометрии сепаратора и входных параметров потока.

2. Проведена оценка сил, действующих на частицу пыли в сепараторе, и выявлено, что основными силами в процессе сепарации являются центробежная сила и сила взаимодействия между фазами.

3. С учетом перечисленных выше силовых факторов разработана математическая модель динамики многокомпонентного двухфазного турбулентного потока с привлечением различных моделей турбулентности, которые адекватно описывают исследуемый объект.

4. С помощью преобразования координат сложная область течения приведена в прямоугольную область, которое позволяет проведения численных расчетов в регулярной области. Получена система уравнений для несущей газовой и дискретной твердой фаз, для которых сформулированы начальные и граничные условия для исследуемой задачи.

5. Разработан симбиоз метода конечных разностей и метода SIMPLE, который позволил использовать линейных (SARC, SST-RC) и нелинейной (SSG/LRR-RSM) моделей турбулентности для исследования физических процессов в центробежной сепарации. Доказано, что нелинейная модель турбулентности SSG/LRR-RSM более адекватно описывает процесс, так как она учитывает анизотропную турбулентность, которая обусловлена сложной формой области расчета и закруткой потока.

6. Проведен вычислительный эксперимент по сепарации порошка цинка для различных фракций. В результате определены оптимальные скорость введения двухфазной среды, форма и угол установления лопаток в устройстве закрутки, которые обеспечивают максимальную эффективность сепарации порошка.

7. Использование оптимальных параметров потока и устройства позволили разработать сепаратор, который позволил увеличить эффективность сепарации от 50% до 70% в производственных и от 70% до 92% в лабораторных условиях.

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

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

MADALIEV MURODIL ERKINJON UGLI

**MODELING OF PROCESSES OCCURRING IN AIR SEPARATORS
BASED ON THE THEORY OF MULTIPHASE MEDIA**

01.02.05 – Mechanics of liquid and gas

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

Tashkent – 2020

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2018.2.PhD/FM235

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

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

Scientific adviser:	Malikov Zafar Mamatkulovich Doctor of Technical Sciences
Official opponents :	Khuzhayorov Bakhtiyor Khuzhayorovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Arifjanov Aybek Muhamedjanovich Doctor of Technical Sciences, Professor
Leading organization:	Scientific and innovation center information and communication technologies at the Tashkent university of information technologies

Defense will take place «2» december 2020 at 14⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 33, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number №. 2). (Address: 100125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 33. Tel. (99871) 262-71-52).

Abstract of the dissertation sent out on “18” november 2020y.
(mailing report №. 2 on “18” november 2020 y.)



[Handwritten signatures of M.M. Mirsaidov, M.K. Usarov, and I.K. Khuzhaev]

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

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

I.K. Khuzhaev
Chairman of the council seminar at the
Scientific Council for the awarding
degrees, doctor of technic sciences

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is the determination of the optimal design parameters of a centrifugal separator by applying a mathematical model of turbulent flows of two-phase polydisperse media.

The object of the research work are centrifugal separators that are widely used in industry.

The scientific novelty of the work is as follows:

for the first time a mathematical problem of a two-phase swirling flow in a separator was formulated using a nonlinear model of turbulence of Reynolds stresses RSM, taking into account interphase interaction, and its advantage in adequacy relative to other models was proved;

a method for the numerical solution of the system of Reynolds equations in new variables based on a nonlinear turbulence model has been developed;

methods and a program for calculating the optimal parameters of auxiliary elements of the newly developed centrifugal separator were developed;

a highly efficient centrifugal separator based on the developed trapezoidal blades was created to separate the powder.

Implementation of research results. According to the results of the study of turbulent flows of two-phase polydisperse media in a centrifugal separator:

the optimal design parameters of the centrifugal separator were introduced in the production of a zinc powder separator for the Almalyk Mining and Metallurgical Combine (certificate of OJSC "Almalyk Mining and Metallurgical Combine" dated February 21, 2020 No. AS-01441). As a result, it was possible to separate the PC-4 zinc powder with an average size of 7 microns (GOST 12601-76);

According to the results of the study of the aerodynamics of the process inside the separator, the rational parameters of the device were found (certificate of JSC "Almalyk Mining and Metallurgical Combine" No. AS-01441 dated February 21, 2020). As a result, the indicator of Efficiency. The zinc powder separator has been increased from 50% to 70% during production.

Volume and structure of dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of used sources and applications. The dissertation is 101 pages long.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-бўлим (I часть; I part)

1. Маликов З.М., Йулдашев А.Т., Мадалиев М.Э. Особенности и анализ пневматической сепарации порошковых материалов // Проблемы механики. Ташкент, 2018, №3. – С. 44-47. (01.00.00; № 4)
2. Маликов З.М., Назаров Ф.Х., Мадалиев М.Э. Численное моделирование обтекания плоской пластины турбулентным потоком воздуха с нулевым градиентом давления на основе k-ε моделей // Проблемы механики. Ташкент, 2018, №4. – С. 33-37. (01.00.00; № 4)
3. Madaliev M.E. Numerical Solution of the Problem on a Centrifugal Separator Based on SA and SARC Turbulence Models // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 6, Issue 7, July 2019. –Pp.10118-10124. (05.00.00; № 8)
4. Маликов З.М., Йулдашев А.Т., Мадалиев М.Э. Экспериментальное исследование эффективности центробежного воздушно-проходного сепаратора // Проблемы механики. Ташкент, 2019, №3. – С. 27-30. (01.00.00; № 4)
5. Мадалиев М.Э. Численное моделирование течения в центробежном сепараторе на основе моделей SA и SARC // Математическое моделирование и численные методы. Москва, 2019, №2. – С. 35-50. (01.00.00; № 30)
6. Маликов З.М., Мадалиев М.Э. Численное исследование воздушного центробежного сепаратора на основе модели турбулентности SARC // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Ташкент, 2019, №6(24). – С. 72-83. (01.00.00; № 9)
7. Мадалиев М.Э. Исследование моделей турбулентности SA и SARC для расчета слабозакрученных течений // Проблемы механики. Ташкент, 2019, №4. – С. 82-87. (01.00.00; № 4)
8. Маликов З.М., Мадалиев М.Э. Численное моделирование двухфазного потока в центробежном сепараторе // Прикладная математика и механика. Москва, 2020, том 84, № 5. – С. 590-611.
9. Madaliev M.E. Numerical Calculation of an Air Centrifugal Separator Based on the SARC Turbulence Model // Journal of Applied and Computational Mechanics. 6(SI), 2020, –Pp.1133-1140. ISSN: 2383-4536, DOI: 10.22055/JACM.2020.31423.1871.

II-бўлим (II часть; II part)

10. Мадалиев М.Э. Численное исследование свободной турбулентной круглой струи // Ажиниёз номидаги Нукус Давлат педагогика институтида 2019 йил «Фаол инвестициялар ва ижтимоий ривожланиш йили»га бағишланиб «Фан ва таълим-тарбиянинг долзарб масаллари»

мавзусида ўтказилган Республика илмий-назарий анжумани. Нукус, 2019 йил 27-28 март. – 445-447 б.

11. Маликов З.М., Мадалиев М.Э. Численное моделирование турбулентного течения в осесимметричной дозвуковой турбулентной струи на основе стандартной k-ε модели // Ўзбекистон Республикасида “2018 йил-фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йили” га бағишланган профессор-ўқитувчилар илмий-амалий анжумани. Фарғона. – 159-162 б.

12. Мадалиев М.Э. Сравнение численных результатов моделей турбулентности для избыточной скорости и температуры в спутном потоке // «Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари» Халқаро илмий-амалий конференция 2019 йил 15 апрель, Андижон. – 341-343 б.

13. Мадалиев М.Э. Численное моделирование турбулентных струй // Материалы Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях, Фергана, 24-25 мая 2019 г. – С. 12-15.

14. Мадалиев М.Э. Сравнительное тестирование моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса, Менстера и Секундова на задаче течения осесимметричной дозвуковой струи // Материалы Международной научно-практической интернет-конференции: Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации. Переяслав-Хмельницкий–2019, 31 мая 2019 г. – С. 412-417.

15. Мадалиев М.Э. Численные решения задачи центробежного сепаратора на основе моделей SARC и k-ε // Материалы III Международной научно-практической конференции: Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века. I том. Нур-султан, 10-12 июля 2019. – С. 272-280.

16. Маликов З.М., Мадалиев М.Э. Применение модели турбулентности Спаларта-Аллмараса для численного расчета турбулентных потоков // Свидетельство DGU 05906. Агентство по интеллектуальной собственности РУз.

17. Маликов З.М., Мадалиев М.Э., Курбанова Н.У. Применение модели турбулентности сдвиговых напряжений Менстера для численного расчета турбулентных потоков // Свидетельство DGU 06261. Агентство по интеллектуальной собственности РУз.

18. Мадалиев Э.У., Мадалиев М.Э. Математическое моделирование скоростей течения идеально ньютоновской, несжимаемой, вязкой жидкости по криволинейно плавно сужающемуся участку трубы // Свидетельство DGU 05926. Агентство по интеллектуальной собственности РУз.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«ЎзМУ хабарлари» тахририятида таҳрирдан ўтказилди.

Босишга рухсат этилди: 13.10.2020 йил