

**И. РАЗЗАКОВ АТЫНДАГЫ КЫРГЫЗ МАМЛЕКЕТТИК ТЕХНИКАЛЫК  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**Б. ЕЛЬЦИН АТЫНДАГЫ КЫРГЫЗ-РОССИЯ СЛАВЯН УНИВЕРСИТЕТИ**

**Д 01.22.652 диссертациялык кеңеши**

Кол жазма укугунда  
УДК 519.63

**КАЛБЕКОВА МАХБУРАТ ЖАМШИТБЕКОВНА**

**ТУРБУЛЕНТТИК АГЫМДАРДЫ КАЛКЫМА КУБУЛУШУН ЭСКЕ  
АЛУУ МЕНЕН САНДЫК МОДЕЛДЕШТИРҮҮ**

01.02.05 – суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы

физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын  
изденип алуу үчүн жазылган диссертациянын

**АВТОРЕФЕРАТЫ**

**Бишкек - 2023**

Диссертациялык иш Ош мамлекеттик университетинин жалпы физика жана физиканы окутуунун усулдугу кафедрасында аткарылган.

**Илимий жетекчи:** **Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич**, физика-математика илимдеринин доктору, доцент, Ош мамлекеттик университетинин математика жана табигый илимдер кафедрасынын башчысы (Кыргызстан, Ош);

**Расмий оппоненттер:** **Бекетаева Асель Орозалиевна**, физика-математика илимдеринин доктору, Аль-Фараби атындагы Казак улуттук университетинин математикалык жана компьютердик моделдөө кафедрасынын доценти (Казахстан, Алматы);

**Байболотов Бакытбек Андабекович**, физика-математика илимдеринин кандидаты, К. Тыныстанов атындагы Ысык-Көл мамлекеттик университетинин маалыматтык системалар жана технологиялар кафедрасынын башчысы, (Кыргызстан, Каракол);

**Жетектөөчү мекеме:** К. И. Сатпаев атындагы Казак улуттук изилдөө техникалык университетинин “Энергетикада моделдөө” илимий-өндүрүштүк лабораториясы. Дареги: Казахстан, 050013, Алматы ш., Сатпаев көчөсү, 22.

Диссертацияны коргоо 2023-жылдын 29-сентябрында саат 14:00дө И. Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетине жана Б. Ельцин атындагы Кыргыз-Россия Славян университетине караштуу физика-математика илимдеринин доктору (кандидаты) окумуштуулук даражасын изденүүгө диссертацияларды коргоо боюнча түзүлгөн Д 05.22.652 диссертациялык кеңешинин жыйынында өтөт. Дареги: Кыргызстан, 720044, Бишкек шаары, Ч. Айтматов проспектиси, 66, ауд. 1/257. Диссертациянын коргоосунун онлайн трансляциялоонун шилтемеси: <https://vc.vak.kg/b/012-scz-oh6-lwn>.

Диссертация менен И. Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин (720044, Бишкек ш., Ч. Айтматов пр., 66) жана Б. Ельцин атындагы Кыргыз-Россия Славян университетинин (720000, Бишкек ш., Киев көч., 44) китепканаларынан жана Кыргыз Республикасынын Президентине караштуу Улуттук аттестациялык комиссиянын сайтынан <https://vak.kg/> таанышууга болот.

Автореферат 2023-жылдын 30-августунда таркатылды.

Диссертациялык кеңештин окумуштуу  
катчысы, ф.-м.и.к., доцент



Т. Т. Кожошов

## ИЗИЛДӨӨНҮНҮН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ

**Диссертациянын темасынын актуалдуулугу.** Экологиянын азыркы проблемаларына болгон кызыгуунун улам өсүп жаткандыгынын натыйжасында айлана чөйрөдөгү жылуулук жана массалык таралуу механизмдерин изилдөөгө олуттуу көңүл бурулууда.

Атмосферанын чек аралык катмарындагы жана суудагы агымдар тыгыздыгы (температурасы) боюнча стратификацияланган, жана табигый конвекция (калкыма) жылуулук менен массанын таралышына олуттуу таасир тийгизет. Айлана чөйрөнүн проблемаларынан сырткары, табигый конвекциянын (калкыма) тийгизген таасири маанилүү болгон индустриалдык жылуулук жана масса алмашуу жабдууларын түзүү практикалык маселелерин чечүүдө, бул кубулуштардын таасирин түшүнүү жана түшүндүрө билүү зарыл болуп эсептелинет.

Айлана чөйрөдө жылуулуктун жана массанын таралуу маселелери С. В. Патанкардын (1984, 2003), С. С. Кутателадзенин (1962), И. А. Беловдун, С. А. Исаевдин (2001, 2005), Ю. А. Быстровдун (2005), Н. А. Кудрявцевдин (2005), А. И. Леонтьевдин (2005), А. А. Горбуновдун (2007), С. А. Никитиндин (2007), В. И. Полежаевдин (2007) жана башкалардын эмгектеринде каралган.

Электрондук түзүлүштөрдү муздатуу, имараттардын ичиндеги абанын агымы, күн коллекторундагы жылуулуктун берилиши жана башкалар, инженерлер үчүн кызыгууну жаратуучу көп сандаган тиркемелерди моделдөөдөгү жабык имараттардын ичиндеги табигый конвекциялык агымдын потенциалы көптөгөн изилдөөчүлөрдүн көңүлүн өзүнө бурган.

**Диссертациянын темасынын илимий программалар менен же илимий изилдөө иштери менен байланышы.** Иш изденүүчүнүн жекече демилгесинин негизинде аткарылган.

**Изилдөөнүн максаты:** OpenFOAM пакетинин алкагында газдын турбуленттүү агымдарын табигый конвекциянын (калкыманын), желдетүүнүн жана жылуулук нурдануунун таасирин эске алуу менен моделдештирүүгө жөндөмдүү моделин өркүндөтүү болуп саналат.

### **Коюлган максатка жетүү үчүн төмөнкү маселелер чечилди:**

- Колдонулуп жаткан пакеттин мүмкүнчүлүктөрүн сынап көрүү аркылуу табигый конвекция (калкыма), желдетүү жана жылуулук нурдануу кубулуштарын моделдештирүү.

- Табигый конвекциянын (калкыманын) таасирин эсепке алуу менен ар кандай аспекти катыштардагы каверналардагы турбуленттүү агымдарды моделдештирүү.

- Стационардык эмес шартта орточо температуранын ар кандай чек ара шарттарынын орточо температуранын жана орточо ылдамдыктын талааларына тийгизген таасирин изилдөө.

▪ Жылуулук нурдануусун эске алуу менен бөлмөнүн моделиндеги турбуленттүү агымдарды моделдештирүү.

▪ Табигый конвекцияны (калкыманы) эске алуу менен ОшМУнун Жалпы физика жана физиканы окутуунун усулу кафедрасынын жана Лекциялык залдын ар кандай желдетүү схемаларынын комфорт шарттарына тийгизген таасирин изилдөө.

#### **Иштин алынган натыйжаларынын илимий жаңылыгы:**

▪ 28.6:1 аспекттик катыштагы кавернаны моделдөөдө температуранын жана ылдамдыктын вертикалдык компоненттерин эсептөөдө алынган профилдери менен эксперименттин ортосунда канааттандырарлык дал келүүчүлүк аныкталды. Рэлейдин санынын маанилери  $Ra=8.6 \cdot 10^5$  тен  $Ra=1.43 \cdot 10^6$  га көбөйүшү сандык маалыматтар менен эксперименттин ортосундагы айырманын 0.6% ке өсүшүнө алып келери көрсөтүлдү.

▪ 5:1 аспекттик катыштагы кавернадагы конвекцияны моделдөө, эксперимент менен орточо агымдын муздак жана ысык дубалдардын жанындагы мүнөздөмөлөрүнүн профилдерин салыштыруу максималдуу каталыктары тиешелүү түрдө 1.9%, 3.5%, 2.6% жана 1.3%, 2.2 %, 1.7% чегинде болушу көрсөтүлдү.

▪ Бөлмө моделин пол аркылуу жылытуунун практикалык колдонуусу сандык моделдөө аркылуу негизделди. Моделдин орточо узундугуна салыштырмалуу борборлору координаталары  $(x=3.69, y=3, z=1)$  жана  $(x=6.31, y=3, z=1)$  чекиттерде жайгашып карама-каршы багытта айланган эки симметриялык куюндун пайда болушу көрсөтүлдү.

▪ ОшМУнун Жалпы физика жана ФОУ кафедрасында комфорттук шарттарын сандык эсептөө биринчи жолу жүргүзүлдү. Кириүүчү чек арасынын вертикалдык координатын  $z=0.5$ мге чейин азайтуу  $(x=2, y=1.5, z=1\text{м})$  чекитиндеги абанын жашынын  $z=2$ м учуруна салыштырмалуу эки эседен ашык өсүшүнө алып келери аныкталды.

▪ Каралган 9 желдетүү схемаларынын ичинен 9-схема бөлмөнүн узундугу боюнча 2.2м жана  $z=1.5$ м бийиктикке чейин КР нормативдерине ылайык оптималдуу комфортту камсыздай турганы көрсөтүлдү.

▪ ОшМУнун Лекциялык залындагы табигый конвекцияны каптал дубалдар аркылуу уюштуруу, залдын шыбы аркылуу желдетүү схемасына салыштырмалуу таза абанын алмашуусун 3.7% (1 м бийиктикте) жакшырттары байкалды.

**Алынган жыйынтыктардын практикалык баалуулугу.** Диссертациялык ишти аткарууда алынган натыйжалар ички турбуленттик агымдарды калкыма, желдетүү кубулуштарын жана жылуулук нурданууну эске алуу менен математикалык моделдөө ыкмаларын жакшыртууга белгилүү өлчөмдө салым кошушат.

Жылуулук/масса алмашуунун, желдетүүнүн жана жылуулук нурдануунун түрдүү маселелеринде OpenFOAM ачык пакетин колдонуу менен моделдөөнүн

толук алгоритмин так документтештирүүнү өзгөчө белгилей кетүү абзел.

Иштин жыйынтыктарын жогорку курстун студенттери, магистранттар жана тийишелүү адистиктердин аспиранттары үчүн окуу материалы катары окуу процессинде пайдаланууга болот.

**Диссертациянын коргоого коюлуучу негизги жоболору:**

- Табигый конвекцияны (калкыманы), желдетүүнү жана жылуулук нурдануунун кубулуштарын эске алуу менен газдын турбуленттүү агымдарын моделдөө үчүн buoyantSimpleFOAM стандарттык чечүүчүсүнүн өзгөртүлгөн варианты менен моделдөөнүн натыйжалары.

- Ылдамдыктын жана температуранын талааларынын бөлүштүрүлгөн параметрлеринин негизинде имараттын жылуулук комфортун иштелип чыккан баалоо ыкмасы.

**Илимий жоболордун, жыйынтыктардын жана сунуштардын аныктыгы** маселенин корректүү коюлушу, математикалык моделдештирүүнүн ыкмаларын негиздүү пайдалануу, өткөрүлгөн эсептик эксперименттердин жетиштүү көлөмү жана алынган сандык натыйжаларды тиешелүү эксперименттик жана башка авторлордун эсептик берилгендери менен салыштыруу аркылуу камсыздалат.

**Изденүүчүнүн жеке салымы.** Диссертация автор тарабынан жүргүзүлгөн өз алдынча изилдөөнүн натыйжасы болуп саналат. Автордун жеке салымы жумушту аныктоодо жана анын максатын коюуда, коюлган максатка жетүү ыкмаларын тандоодо, изилдөө жүргүзүүгө, алынган натыйжаларды талдоо жана корутундуларды түзүүдө, макалаларды жарыялоодо аныкталган. Жыйынтыгын талкуулоого, илимий жетекчи ф-м.и.д, доцент Курбаналиев А.Ы., ф-м.и.д, профессор И. Ташполотов, профессор Сопуев А. катышышты.

**Диссертациянын натыйжаларын апробациялоо.** Бул диссертациялык ишти аткарууда алынган натыйжалар төмөнкү эл аралык, республикалык конференцияларда жана семинарларда баяндалган:

- Профессор С. А. Абдрахмановдун 80 жылдыгына арналган «Колдонмо механика жана инновациялык технологиялар» Эл аралык илимий конференциясы, 12-январь 2023-жыл, И. Раззаков атындагы КМТУ, Бишкек, Кыргыз Республикасы.

- III Эл аралык илимий конференция MIP: Engineering-III 2021: Модернизация, Инновация, Прогресс: Материал таануу, Механика жана автоматташтыруу инженериясындагы алдыңкы технологиялар. 29-30-апрель, 2021-жыл, Красноярск, Россия.

- Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги, физика-математика илимдеринин доктору, профессор Жайнаков Аманбектин 80 жылдыгына арналган “Илимдеги жана тоо-кен, техникалык билим берүүдөгү маалыматтык технологиялар жана математикалык моделдөө” эл аралык илимий конференциясы, Кыргызстан, Бишкек, 06-08-октябрь, 2021-жыл.

- XIV, XV Эл аралык Азия мектеби-семинар «Татаал системаларды оптималдаштыруу маселелери». «Отел Евразия» пансионаты, Ысык-Көл, Кыргыз Республикасы, 2018-жылдын 20-июлунан 31-июлуна чейин, Академгородок, Новосибирск, Россия, 26-30-август 2019-жыл.

- Кыргыз Республикасынын Геологиялык кызматынын 80-жылдыгына арналган “Геологиянын, тоо ишинин жана билим берүүнүн актуалдуу проблемалары жана перспективалары” Бишкек, 2018.

- Республикалык илимий-практикалык конференция «Билим берүү жана илимдеги физика-техникалык проблемалар», М. М. Адышев атындагы Ош технологиялык университети, Ош, Кыргызстан, 18-19-май, 2018-жыл.

**Диссертациянын жыйынтыктарынын басылмаларда чагылдырылышынын толуктугу.** Изилдөөнүн негизги жыйынтыктары 11 илимий макалада жана 3 автордук күбөлүктө, анын ичинде Скопус (2), РИНЦ (3) маалымат базасына кирген Кыргыз Республикасынан тышкары илимий журналдарда жарык көргөн.

**Диссертациянын структурасы жана көлөмү.** Диссертация киришүүдөн, 3 баптан, корутундудан, практикалык сунуштардан, библиографиядан жана тиркемелерден турат. Эмгекте 135 барактан турган текст, 61 сүрөт, 23 таблица, 88 библиографиялык шилтеме жана 4 тиркемелер бар.

Диссертациялык жумуш Ош мамлекеттик университетинде аткарылды. Автор жетекчиси ф.-м.и.д., доцент А.Ы. Курбаналиевге, жалпы физика жана физиканы окутуунун усулу кафедрасынын башчысы, п.и.к., доцент М. М. Жумановага жана Ош мамлекеттик университетинин ректору ф.-м.и.д., профессор К. Г. Кожобековго бул иштин ийгиликтүү аткарылышы үчүн жагымдуу шарттарды түзүп беришкендиктери үчүн жана ар тараптуу колдоо көрсөткөндүктөрү үчүн ыраазычылык билдирет.

Ар кандай конференцияларда жана семинарларда диссертант, физика-математика илимдеринин доктору, профессор М. Ж. Жаманбаев менен баарлашууга мүмкүнчүлүк алды жана бир катар сын-пикирлери жана көптөгөн пайдалуу кеңештерине ыраазычылык билдирет.

Автор электрондук дарек боюнча [mkalbekova@list.ru](mailto:mkalbekova@list.ru), айтылган ар кандай каалоолорду жана пикирлерди туура түшүнүү менен кабыл алат.

## **ДИССЕРТАЦИЯНЫН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ**

**Киришүүдө** теманын актуалдуулугу негизделип, изилденип жаткан маселенин коюлушу, изилдөөнүн максаты жана маселелери формулировкаланып, эмгектин илимий жаңылыгы жана практикалык мааниси көрсөтүлдү. Кысылбоочу суюктуктун агымдарын учурдагы моделдөө ыкмалары, алардын артыкчылыктары жана кемчиликтери анализделинет. Диссертациянын түзүлүшү жана негизги мазмуну бөлүмдөр боюнча кыскача баяндалды.

**Биринчи бапта** жабык каверналардагы табигый конвекция (калкыма) кубулушун эске алуу менен кысылбоочу суюктуктардын турбуленттүү

агымдарын моделдөөнүн заманбап усулдары боюнча адабияттар каралды. Жеткиликтүү илимий адабияттардын жана башка авторлордун жыйынтыктарынын анализи өткөрүлдү.

**Экинчи бап «Методология жана изилдөө ыкмалары»** OpenFOAM пакетинин алкагында контролдук көлөмдөрдүн ыкмаларынын негизинде жалпыланган өзгөрмөлөр үчүн ташуунун жалпыланган теңдемесин дискретизациялоо ыкмалары каралып чыкты.

Табигый конвекция (калкыма), желдетүү жана жылуулук нурдануу кубулуштарын эске алуу менен рециркуляция зоналары бар мейкиндиктеги турбуленттүү туруксуз ички агымдар **изилдөөнүн объектиси** болуп саналат.

Бөлмөнүн жылуулук чөйрөсүнүн эргономикасына табигый конвекция (калкыма) кубулушунун тийгизген таасирин сандык моделдөө **изилдөөнүн предмети** болуп саналат.

Каралып жаткан стационардык эмес маселенин математикалык модели үзгүлтүксүздүк теңдемесин, импульстун жана энтальпиянын которулуусун камтыган Навье-Стокстун теңдемелеринин системасына негизделген.

$$\frac{\partial \rho_{ref}}{\partial t} + \nabla(\rho_{ref} \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_{ref} \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{ref} \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho_{ref} g [1 - \beta(T - T_{ref})] + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(\mathbf{u})) - \nabla \cdot \left( \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right); \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_{ref} h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{ref} \mathbf{u} h) + \nabla \cdot (\rho_{ref} \mathbf{u} k) = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) + \rho_{ref} \mathbf{u} \cdot \mathbf{g} + h_R \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ref} \tau) + \nabla(\rho_{ref} \mathbf{u} \tau) - \nabla \cdot \left( \frac{\rho_{ref} \mu_{eff}}{\sigma_{eff}} \nabla \tau \right) = 1 \quad (4)$$

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT$$

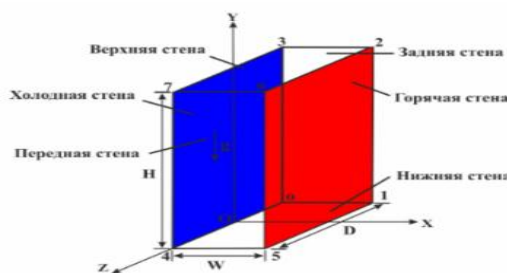
Агымдын турбуленттүүлүгүн эсепке алуу OpenFOAM пакетине кийрилген турбуленттүүлүктүн ар кандай моделдерине негизделген.

**Үчүнчү бапта – “Турбуленттик агымдарды калкыма кубулушун эске алуу менен сандык моделдөө”** өздүк изилдөөлөрдүн натыйжалары келтирилген.

### **1-маселе. BuoyantSimpleFoam чечүүчүнү модернизациялоо.**

Бийиктиги боюнча созулган кавернадагы табигый конвенцияны сандык моделдөө каралган Betts, P.L., Vokhari I.H.,(2000). Кавернанын бийиктиги  $H = 2.18\text{м}$ , узуну  $W = 0.076\text{м}$ , ал эми туурасы  $D = 0.52\text{м}$  ге барабар, (3.1-сүрөттү караңыз).

**Чек ара жана баштапкы шарттар.** Оңдогу ысык жана солдогу муздак



3.1-сүрөт. Кавернанын схемасы, эсептөө областынын чокулары жана координаталар системасы

капталдык дубалчалардын айырмасы  $19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  жана  $39.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  га барабар болуп,  $W$  кавернанын узундугу боюнча эсептелген Рэлейдин сандарына шайкеш келишет, алар  $Ra=8.6\times 10^5$  жана  $Ra=1.43\times 10^6$  барабар болот. Кавернанын капталдарында  $U$  ылдамдыгынын вектору үчүн – no-slip жабышуу шарты берилген.

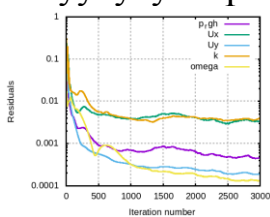
Алдыңкы, арткы, жогорку жана төмөнкү капталдарындагы температура үчүн zeroGradient – нормаль боюнча нөлдүк градиенттин шарттары берилген, алар бул чек ара аркылуу жылуулуктун агымынын жоктугун камсыздашат. Бардык эсептөөлөрдө муздак каптал дубалдын температурасы  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  га барабар болуп, ысык каптал дубалдын температурасы Рэлейдин санына байланыштуу өзгөрүп турган – ал төмөндөгүлөр:  $Ra=8.6\times 10^5$  те ал  $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  барабар болгон, ал эми  $Ra=1.43\times 10^6$  да –  $54.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Алты чек аралардын бардыгындагы басым үчүн FixedFluxPressure шарты берилген, ал чек арадагы агым ылдамдыктын чек аралык шарты менен берилгендей кылып басымдын градиентинин маанисин аныктайт.  $k$  турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясынын жана  $\omega$  турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясынын диссипациясынын ылдамдыгынын чек ара шарттары дубалга жакын функцияларынын жардамында берилген.

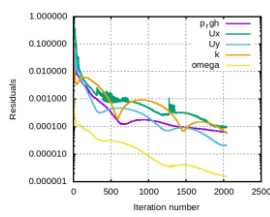
Кавернанын ичиндеги ылдамдык векторунун талаасынын баштапкы мааниси нөлгө барабар болгон, анткени баштапкы учурда аба кыймылы болгон эмес.

Аба менен толтурулган квадраттык каверна үчүн окшош чек ара шарттары берилген.

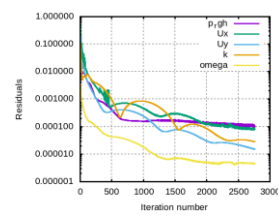
**Сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары.** 3.2а-сүрөттө Рэлей саны  $Ra=8.6\times 10^5$  менен стандарттык чечүүчү үчүн каталыктар келтирилген. Итерациялоо процесси  $1\times 10^{-4}$  берилген тактыкта оңдолгон чечүүчүнү колдонуу учурунда Рэлей санынын  $Ra=8.6\times 10^5$  жана  $Ra=1.43\times 10^6$  маанилери үчүн тиешелүү түрдө 2039 (3.2б-сүрөт) жана 2759 (3.2в-сүрөт) итерациялоо санында жыйналуучулук мүнөзгө ээ болот.



а)  $Ra=8.6\times 10^5$



б)  $Ra=8.6\times 10^5$



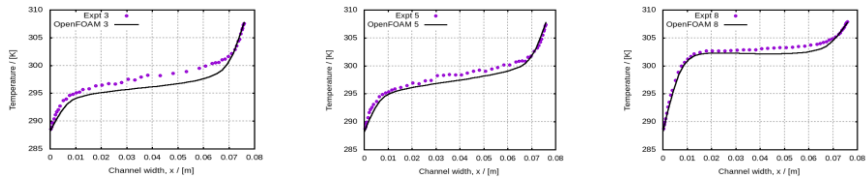
в)  $Ra=1.43\times 10^6$

3.2-сүрөт. Рэлейдин ар түрдүү сандарында өзгөртүлбөгөн (а) модификацияланган (б, в) чечүүчүнүн каталыктары

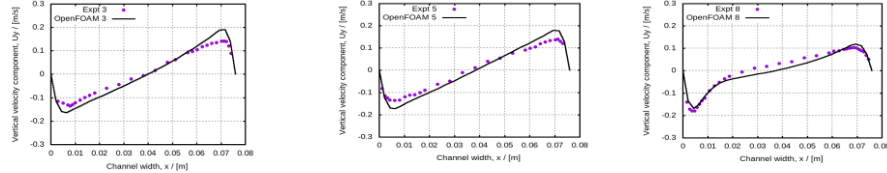
Каталыктардын мааниси модификацияланган учурда стандарттык чечүүчү үчүн болгон каталыктардын маанилеринен 2 (100 эсеге) тартипке төмөн болушат, бул киргизилген өзгөртүүлөрдүн туура экендигин айгинелейт.

Сандык натыйжалардын тиешелүү эксперименталдык берилгендер менен салыштырылышы 3.3 - 3.4 - сүрөттөрдө көрсөтүлгөн.





3.3-сүрөт. Рэлей саны  $Ra=8.6 \times 10^5$  үчүн орточо температуранын профилдери



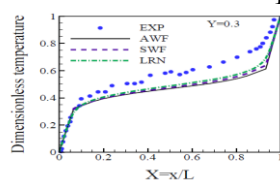
3.4-сүрөт. Рэлей саны  $Ra=8.6 \times 10^5$  үчүн орточо ылдамдыктын  $U_y$  вертикалдык түзүүчүсүнүн профилдери

Бул жана кийинки сүрөттөрдө маркелер тиешелүү эксперименталдык маанилерди билдирет, ал эми үзгүлтүксүз сызык – бул диссертациялык иштин жыйынтыктарына тиешелүү. Сүрөттөрдөгү цифралар бийиктик боюнча жайгашкан рэпердик чекиттерди билдирет жана ошол чекиттер аркылуу өтүүчү тегиздик боюнча температуранын жана ылдамдыктын горизонтальдык профилдери өлчөнгөн.

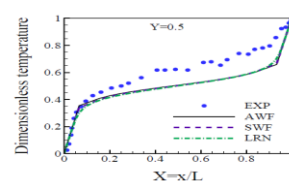
Орточо температуранын жана орточо ылдамдыктын  $U_y$  вертикалдык түзүүчүсүнүн эксперименталдык өлчөөлөр  $z=0$  тегиздигинде өткөрүлдү. Жалпысынан алганда, сандык жана эксперименталдык берилгендердин ортосундагы дал келүүчүлүктү жакшы деп айтууга болот.

Эксперимент менен сандык эсептин ортосундагы дал келүүчүлүк  $Ra=1.43 \times 10^6$  Рэлей саны чоң болгон учурунда начарлашын температуранын жана орточо ылдамдыктын вертикалдык түзүүчүсүнүн профилдерин салыштыруу көрсөттү.

Кийинки сүрөттө 3.5(а, б) да орточо температура боюнча Рэлейдин  $Ra=1.43 \times 10^6$  саны үчүн Seyed Ali Omganian (2007) нин сандык натыйжалары жана тийиштүү эксперименттин берилгендер менен салыштыруу келтирилген.  $y/H=0.3$  (3.5а-сүрөт) жана  $y/H=0.5$  (3.5б-сүрөт) учурларда бул иштеги каталыктар тиешелүү түрдө 25% жана 35.4% түздү. Биздин эсептөөлөрүбүздө тийишелүү каталыктар 1% жана 1.6% га барабар болду.



3.5а-сүрөт.  $y/H=0.3$  орточо температурасынын профили

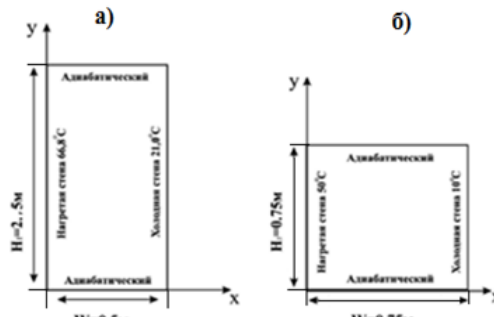


3.5б-сүрөт.  $y/H=0.5$  үчүн орточо температуранын профили

**2-маселе. Аба көндөйлөрдөгү табигый стационардык конвекцияны моделдөө.** Ар кандай аспекттик катыштардагы каверналардагы табигый конвекцияны моделдөө маселесиндеги модификацияланган чечүүчүнүн мүмкүнчүлүктөрүн баалоо бул маселенин максаты болот. 3.6-сүрөттө аспекттик катышы 5:1 болгон каверна Cheesewright R., King KJ, Ziai S (1986) жана жактары

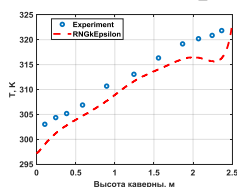
0.75 м болгон квадраттык каверна F. Anrofo жана T. G. Karayiannis (2003) көрсөтүлгөн.

**Чек ара жана баштапкы шарттар.** Биринчи көндөйдүн сол жана оң капталдарындагы чек аралык шарттары катары температуранын тиешелүү түрдө  $t_h = 66.8^\circ\text{C}$  жана  $t_c = 21^\circ\text{C}$  өзгөрбөгөн маанилери берилген (3.6а-сүрөтүн караңыз). Кавернанын жогорку жана төмөнкү дубалдарында адиабаттуулуктун шартты берилет. Бул жерде жана бардык кийинки маселелерде башка чоңдуктар үчүн чек ара жана баштапкы шарттар, дискреттөө жана чечүү ыкмалары мурунку маселеге окшош болот.



3.6-сүрөт. Тик бурчтуу жана квадраттык каверналар

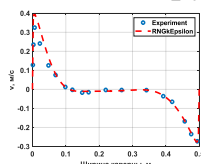
**Натыйжалар жана талкуулоо.** 3.10а-3.10в-сүрөттөрдө турбуленттүүлүктүн RNG  $k - \epsilon$  моделинин жардамында алынган сандык натыйжаларды эксперименттик берилгендер менен салыштыруу келтирилген.



3.10а – сүрөт.

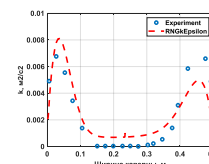
Температуранын вертикалдык профилин салыштыруу

$x=0.25\text{m}$  сызык боюнча температуранын вертикалдуу профилин салыштыруу (көндөйдүн орточо туурасында, 3.10а-сүрөт) жалпысынан турбуленттүүлүктүн RNG $k$ - $\epsilon$  модели эксперименталдык маалыматтардын өзгөрүү мүнөзүн, анын ичинде температуранын профилинин кавернанын үстүңкү дубалына жакын мүнөздүү ийилишин кошо кайталайт.



3.10б – сүрөт.

Уу горизонталдык профилин салыштыруу



3.10в – сүрөт.

$k$  горизонталдык профилин салыштыруу

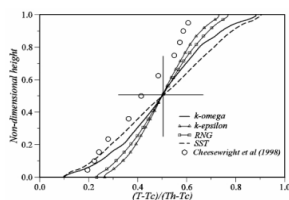
3.10б-сүрөттөн көрүнүп тургандай, горизонталдык сызык боюнча вертикалдык ылдамдыктын сандык маанилери  $y=1.25\text{m}$  (кавернанын орточо бийиктиги) эксперименталдык маалыматтарга жетиштүү түрдө жакшы дал келет. Эгерде муздак дубалдын жанында сандык вертикалдык ылдамдыктын профили экспериментке жогорку тактык менен дал келсе, ысык дубалдын жанында вертикалдык ылдамдыктын сандык мааниси тиешелүү эксперименттик мааниден ашат. Турбуленттик кинетикалык энергиясынын мааниси ысык дубалдын жанында ашыкча, ал эми муздак дубалдын жанында экспериментке салыштырмалуу төмөн болду (3.10в-сүрөттү караңыз).

Cheesewright R., King K. J. and Ziai S. (1986) эксперименталдык ишинде айтылгандай, үстүңкү жана астыңкы дубалдардын жылуулук өткөрбөө шарты жетишсиз болгондуктан, көндөйдүн ысык жана муздак дубалдары аркылуу

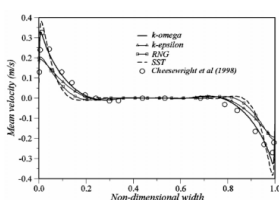
жылуулук өткөрүлүшү боюнча асимметриялык маалыматтар экспериментте табылган. Ansys CFX коммерциялык пакетинин алкагында бул маселени моделдөө боюнча Yingchun Li, (2014) жыйынтыктары 3.11-3.13-сүрөттө көрсөтүлгөн.

Температуранын  $T$ ,  $U_y$  вертикалдык ылдамдыгынын жана  $y=1.25$ м кавернасынын орточо бийиктиктеги  $k$  турбуленттүүлүгүнүн кинетикалык энергиясынын биз алган горизонталдык профилдеринин маанилерин Yingchun Li, (2014) тарабынан алынган сандык берилгендер менен салыштыруу 3.11-таблицада келтирилген.

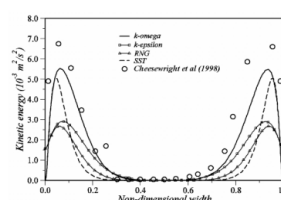
Андан кийин, F. Amrofo жана T. G. Karayiannis (2003) тиешелүү эксперименталдык маалыматтары менен капталдары 0.75 м болгон квадраттык кавернада табигый конвекцияны моделдөө жүргүзүлгөн.



3.11-сүрөт.  
Кавернанын орточо кеңдиктеги бийиктик температуралардын профили



3.12-сүрөт. Кеңдиги боюнча орточо бийиктик боюнча вертикалдык ылдамдыктын уу профили



3.13-сүрөт. Кеңдиги боюнча орточо бийиктик боюнча кинетикалык энергия  $k$

3.11-таблица. Yingchun Li, (2014) эсептик берилгендери менен салыштыруу

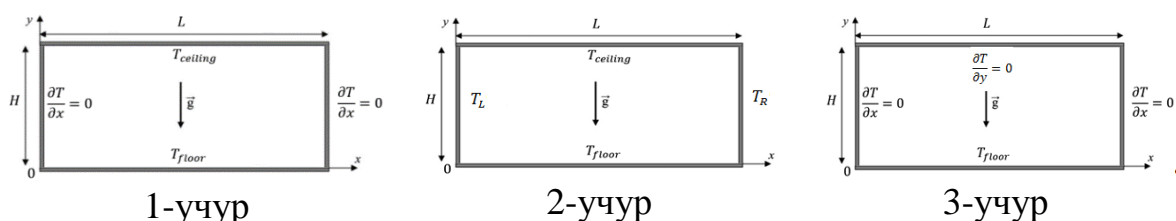
Жыйынтык	Температура		Ылдамдык		Турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясы	
	Ыссык	Муздак	Ыссык	Муздак	Ыссык	Муздак
Биздики	1.3%	1.9%	2.2%	3.5%	1.7%	2.6%
YingchunLi.	20%	6.3%	37%	25%	63%	57%

Агымдын SSG турбуленттик моделин колдонуудагы алынган жалпы үлгүсү LRR моделин колдонуудагыдай эле болот. Квадраттык каверна үчүн сандык чечимдердин натыйжалары 5:1 катышы бар көндөй үчүн натыйжаларга туура келет. Тактап айтканда, квадраттык кавернанын орточо бийиктигиндеги температуранын вертикалдык профили бийиктигиндеги бардык маанилеринде эксперименттик маалыматтарга салыштырмалуу төмөн (3.14a-сүрөттү жана 3.15a -сүрөттү караңыз). Бирок үстүнкү жана астыңкы дубалдардын жанында температуранын градиенттери башкача болушат – үстүнкү дубалдын жанындагы мүнөздүү илмек бул учурда жок. Аспектинин катышы 5:1 болгон каверна үчүн жогоруда белгиленген турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясынын төмөн

мааниси (3.10в-сүрөттү караңыз) квадраттык кавернада да орун алат (3.15в-сүрөт). Бирок, 1:1 катыштагы квадраттык кавернадагы вертикалдык ылдамдыктын жана температуранын горизонталдык профилдери, 5:1 катыштагы кавернадагыдай эксперименталдык маалыматтар менен жетиштүү деңгээлде дал келет (3.10б-сүрөттү караңыз).

### 3-маселе. Релей-Бенардын конвективдүү куюндарын моделдөө.

Бул стационардык эмес маселенин максаты температура үчүн ар түрдүү чек ара шарттарынын орточо температуранын жана орточо ылдамдыктын талааларына орточо тийгизген таасирлерин окуп үйрөнүүдө турат. Аспектинин катышы 0.5 болгон тик бурчтуу кавернада табигый конвекцияны математикалык моделдөө `buoyantPimpleFoam` чечүүчүсүн пайдалануу менен OpenFOAM пакетинин алкагында өткөрүлдү. Аба менен толтурулган каверна бийиктиги  $H=0.5\text{м}$ , узундугу  $L=1\text{м}$  жана туурасы  $W=0.1\text{м}$  болгон гексаэдр болду (3.16-сүрөттү караңыз).



3.16– сүрөт. Маселенин геометриясы жана температуранын ар түрдүү үч чек ара шарттары

**Маселенин чек ара жана баштапкы шарттары.** Басым талаасынын баштапкы мааниси  $101325\text{ Па}$ , кавернада абанын баштапкы кыймылы жок болгондуктан ылдамдыктын бардык компоненттери нөлгө барабар. Эсептөө областынын бардык чектеринде абанын илешкектүүлүгүнөн улам жабышуу шартына ылайык, ылдамдыктын мааниси нөлгө барабар. Каверна ылдыйкы дубал – пол аркылуу жылытылат, анын температурасы бардык каралган үч учурда тең  $T_{floor} = 30^\circ\text{C}$  болгон.

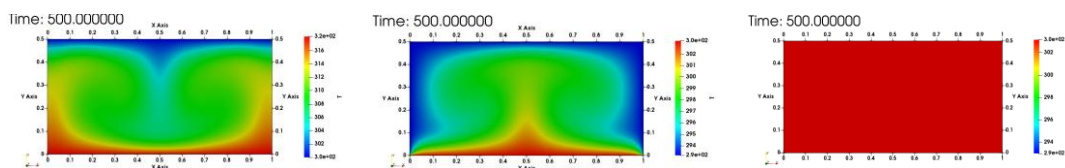
Биринчи учурда каптал чектерде температурага Нейман шарты берилет, башкача айтканда чек арага нормал багыт боюнча нөлдүк градиент берилген. Бул шарт чектин физикалык адиабаттуулугунун абалына - чек ара аркылуу жылуулук агымынын жоктугуна туура келет. Ал эми шыпта жана полдо Дирихле шарты берилген. Экинчи учурда, бардык чектерде температура берилген, ал эми үчүнчү учурда, каптал чектерде жана шыпта температурага адиабаттуулук шарты берилген.

**Сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары.** Төмөнкү 3.17-3.19- сүрөттөр температуранын 1-учур, 2-учур, 3-учур чек ара шарттары үчүн убакыттын ар кандай моменттериндеги температураынын, ылдамдык векторунун, ылдамдык модулунун талааларынын жана ылдамдык модулунун изосызыктары убакыттын ар кандай маанилериндеги эсептөөлөрдүн натыйжалары келтирилген.

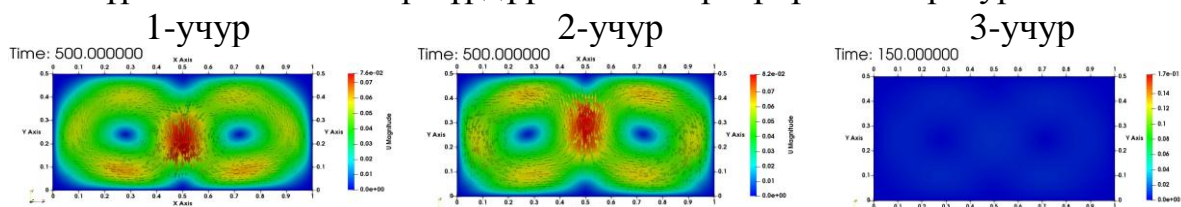
1-учур

2-учур

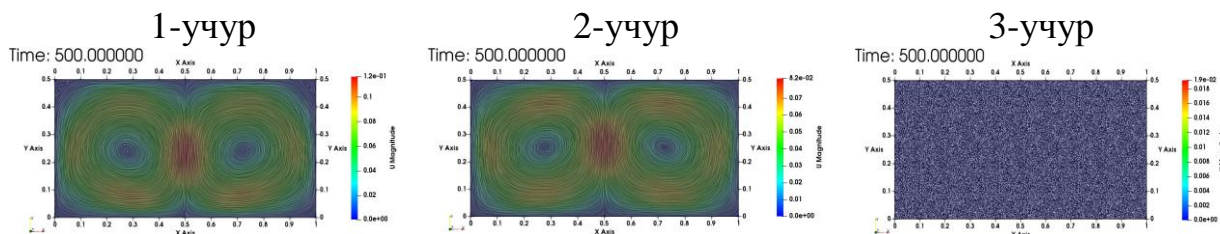
3-учур



3.17–сүрөт. Убакыттын ар түрдүү моменттери үчүн температурнын талаасы



3.18 - сүрөт. Убакыттын ар түрдүү моменттери үчүн ылдамдык векторунун талаасы

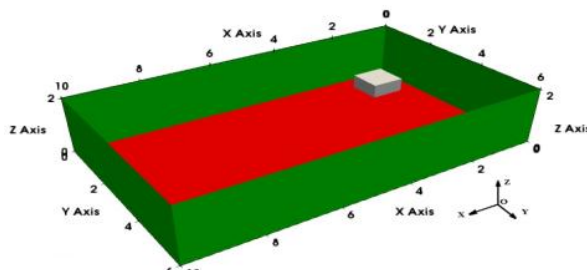


3.19–сүрөт. Ылдамдык модулуунун изолиниялары

Агымдын схемасы температуранын чек шарттарынын түрүнө жараша абдан айырмаланат. 1-учурдан 2-учурга өтүүдө агымдын өзгөрүшү байкалды – чоң конвективдик куюн өз багытын карама-каршы багытка өзгөртөт. Ал эми көңдөйдөгү аба толугу менен адиабаттык шартта ысытылган учурда (3-учур) температура талаасынын теңдеши алгачкы эки учурга (1-учур жана 2-учур) караганда алда канча эртерээк болот. Бул убакыт болжол менен 150 секунд, ал эми калган эки учурда температуранын теңделүү убактысы бир топ узакка созулат.

**4-маселе. Тик бурчтуу көңдөйдө табигый конвенцияны жылуулук нурданууну эске алуу менен моделдөө.**

Туурасынан кесилиши тик бурчтук болгон үч өлчөмдүү кавернадагы кадимки стационардык конвенцияны математикалык моделдөө маселеси каралат. Бөлүмүнүн моделинин бийиктиги  $H = 2\text{м}$ , узундугу  $W = 10\text{м}$ , туурасы  $D = 6\text{ м}$ , ал эми жылуулуктун булагы төмөндөгүдөй өлчөмдөргө,  $h = 0.5\text{м}$ ,  $w = 1.0\text{м}$  жана  $d = 1.0\text{м}$  барабар (3.20-сүрөтүн караңыз). Бетинин температурасы  $500\text{К}$  болгон жылуулук булагы координаталары  $(0.5; 0.5; 0)$ ,  $(1.5; 1.5; 0.5)$  болгон параллелепипеддин



3.20 – сүрөт. Каралуучу маселенин геометриясы жана координаталар системасы

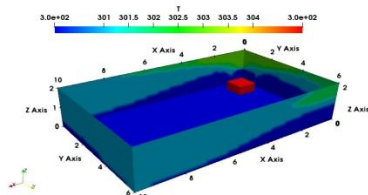


ичинде жайгашкан.

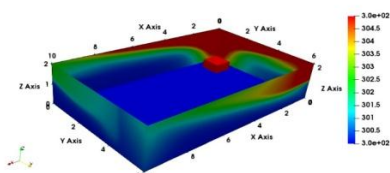
Шыптын жана полдун температурасы 300K, ал эми моделдин жогорку оң бурчунда жайгашкан жылыткычтын температурасы 500K. Көндөйдүн каптал дубалдарында температура үчүн берилген адиабаттуулук шарты бар. Калган өзгөрмөлөрдүн чектик шарттары мурунку маселенин чек ара шарттарына окшош.

3.22-сүрөттө жылуулук нурдануунун P1 (3.22б-сүрөт) жана fvDOM (3.22в-сүрөт) эки модели үчүн каптал дубалдардагы орточо температуранын бөлүштүрүлүшү көрсөтүлгөн.

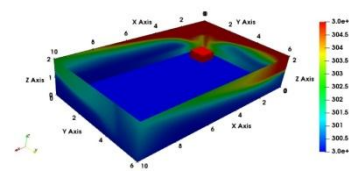
3.22абв-сүрөттөрдөн көрүнүп тургандай, эки моделдин негизги айырмасы жылыткычка эң жакын бурчта пайда болот. 3.23а-3.24б-сүрөттөрдөн көрүнүп тургандай, ысык аба жылуулук булагынан бир нече сантиметр аралыкта жогору карай жылып, абанын температурасы 500 K дан дээрлик 300 K ге чейин төмөндөйт. Ушул себептен улам, 300K дан 320K градуска чейинки шкала колдонулган.



3.22а – сүрөт.  
Жылуулук нурдануусуз температуранын бөлүштүрүлүшү

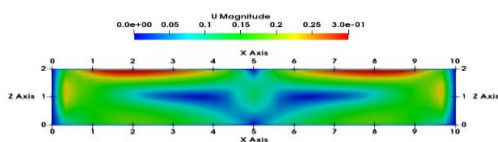


3.22б – сүрөт.  
Жылуулук нурдануунун P1 модели үчүн температуранын бөлүштүрүлүшү

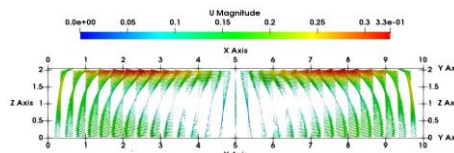


3.22в – сүрөт.  
Жылуулук нурдануунун fvDOM модели үчүн температуранын бөлүштүрүлүшү

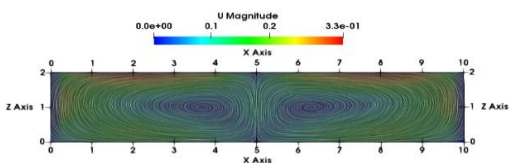
Бул учурда температура жана ылдамдык талааларынын бөлүштүрүлүшү жогоруда каралган учурдан абдан айырмаланат. Муну  $y=3\text{м}$  тегиздиктеги температура жана ылдамдык талаалары көрсөтүлгөн төмөнкү 3.27-3.30 сүрөттөрүнөн даана көрүүгө болот.



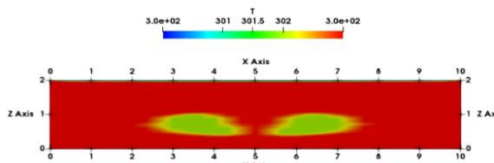
3.27-сүрөт. Ылдамдык модулуунун талаасы



3.28-сүрөт. Ылдамдык векторунун талаасы



3.29-сүрөт. Ылдамдык модулуунун изолиниясы



3.30-сүрөт. Температуранын талаасы

Карама-каршы багытта айлануучу  $x = 5\text{ м}$  сызыгына салыштырмалуу симметриялык эки куюндардын пайда болушун дароо байкоого болот (3.27-сүрөттү караңыз). Аба агымы  $x=0$  жана  $x=10\text{ м}$  сырткы дубалдардын жанынан өйдө көтөрүлүп, анан шыптын жанында бири-бирин көздөй жылат. Бөлмөнүн борборундагы  $x=5\text{ м}$  сызыгынын жанында өз ара кагылышуудан кийин агым төмөн көздөй багытталат. Бөлмөнүн полуна жеткенде аба агымы карама-каршы багыттарга багытталган эки куюнга бөлүнөт (3.29-сүрөттү караңыз). Бөлмөдөгү абанын дээрлик бүт көлөмү конвективдик кыймылга катышкандыктан, эки симметриялык куюндун борборлорунда температуранын бир аз төмөндөшүн эске албаганда, температуранын бөлмөнүн бардык жеринде бөлүштүрүлүшү симметриялуу жана бирдей болот (3.30-сүрөттү караңыз). Ошентип, пол аркылуу бөлмө жылытуу учурун ысытуучу меш бөлмөнүн бурчунда жайгашкан учурга салыштырганда бөлмөнүн ичинде температуранын бирдей бөлүштүрүүгө алып келет деп айта алабыз.

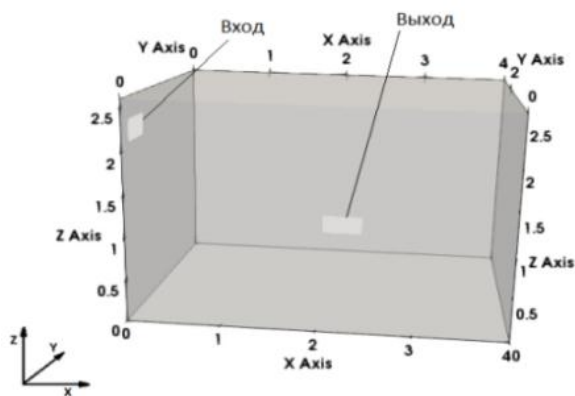
**5-Маселе. Жалпы физика жана физиканы окутуунун усулу кафедрасынын имараттарынын жылуулук комфорттук шарттарын эсептөө.** Бул маселенин максаты – ОшМУнун жалпы физика жана физиканы окутуу усулу кафедрасынын жана Лекциялык залынын комфорттук шарттарына аба агымынын кире бериш чектеринин жайгашуусунун таасирин изилдөө болуп саналат. Стационардык маселенин геометриясы жана координаталар системасы 3.32-сүрөттө көрсөтүлгөн. Бөлмөнүн моделинин узундугу  $L=4\text{ м}$ , бийиктиги  $H=2.6\text{ м}$ , туурасы  $W=3\text{ м}$ .

Кириш чек ара сол дубалдын жогорку оң бурчунда жайгашкан. Анын туурасы  $0.5\text{ м}$ , бийиктиги  $0.2\text{ м}$ , аянты  $0.01\text{ м}^2$ . Чыгуу тешиги арткы дубалдын ортоңку бөлүгүндө, полго жакын жайгашкан. Анын туурасы жана бийиктиги да тиешелүү түрдө  $0.5\text{ м}$  жана  $0.2\text{ м}$  болот.

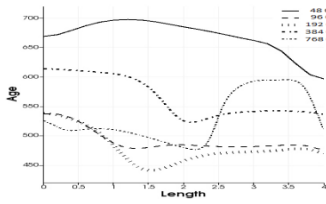
Бул жерде 9 ар кандай схемалар, кирүү ылдамдыгынын 3 түрдүү мааниси, кирүү борборунун бийиктигинин 4 мааниси жана 5 түрдүү эсептөө торлору каралып, бул маселенин бир толук эсеби 540 эсептөө вариантын камтыйт.

**Сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары жана талкуулоо.** Төмөнкү сүрөттөрдө аба жашынын бөлмөнүн геометрикалык борбору аркылуу өтүүчү  $Ox$  (3.34-сүрөттү караңыз),  $Oy$  (3.35-сүрөттү караңыз) жана  $Oz$  (3.36-сүрөттү караңыз) окторуна параллель түз сызыктарды бойлото алынган профилдери көрсөтүлгөн.

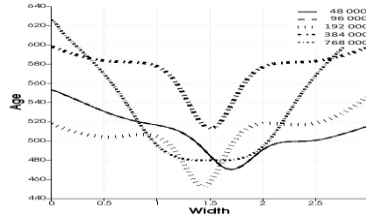
3.35-сүрөттөн алынган сандык чечим кафедранын орточо туурасына карата симметриялуу экени көрүнүп турат, анткени желдетүү схемасынын 9-чусу өзү бул орточо сызыкка карата симметриялуу болгон.



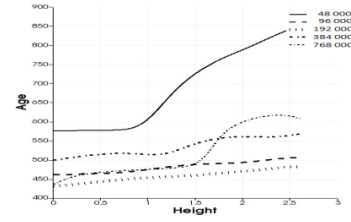
3.32 -сүрөт. Маселенин геометриясы жана координаталар системасы



3.34-сүрөт  
Кафедранын узундугу  
боюнча аба жашынын  
горизонталдык  
профили



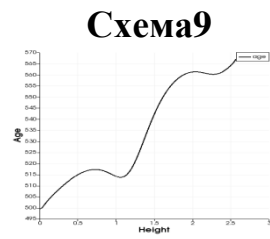
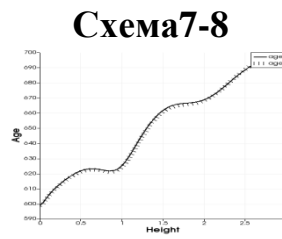
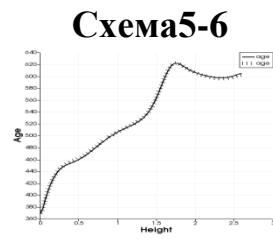
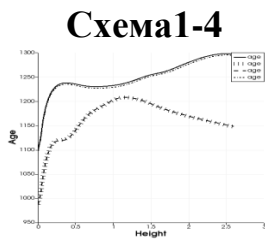
3.35-сүрөт  
Кафедранын туурасы  
боюнча аба жашынын  
горизонталдык профили



3.36-сүрөт  
Кафедранын бийиктиги  
боюнча аба жашынын  
вертикалдык профили

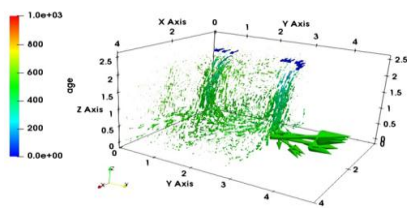
Мындан тышкары, 3.36-сүрөттөн болжол менен 1.5 м бийиктикке чейин, майда сеткалар үчүн сандык натыйжалар (48000 түйүн торунан башкасы) болжол менен 450 с бирдей маанилерди берет. Ал эми 192 000 торчодо аба жашынын эң төмөнкү маанилери алынгандай көрүнөт, бирок сандык чечим борбордук тегиздикке карата симметрия касиетине ээ эмес  $y=1.5$  - симметрия борбору бир аз жылган  $y=1.5$  маанисинин сол жагында.

Төмөнкү сүрөттө Oz огуна параллелдүү жана бөлмөнүн геометриялык борбору аркылуу өткөн сызык боюнча аба жашынын вертикалдуу профили көрсөтүлгөн  $x=2, y=1.5, z=1.3$ .

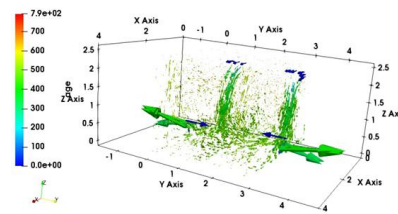


3.37-сүрөт. Вертикалдык аба жашынын профили

Тиешелүү желдетүү схемалары үчүн вертикалдык борбор сызыгы боюнча аба жашынын сандык натыйжаларынын ортосундагы жетишээрлик жакшы дал келүүсү изилдөөнүн натыйжаларынын ишенимдүүлүгүн кыйыр түрдө көрсөтөт. Желдетүүнүн эки схемасы үчүн ылдамдык векторунун бөлүштүрүлүшү 3.38-сүрөттө көрсөтүлгөн.



а)



б)

3.38-сүрөт – 8- схема (а) жана 9-схема (б) үчүн ылдамдыктын вектордук талаасы.



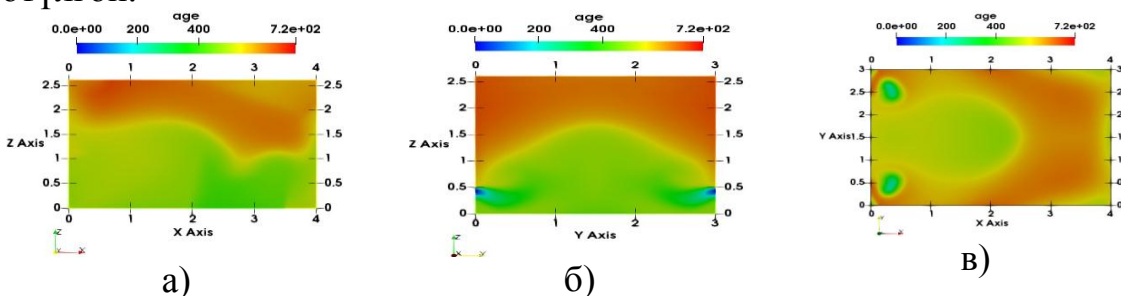
Бул жерде жебелер аба агымынын багытын көрсөтүп, түсү абанын жашына туура келет. Таза, муздак аба киргенден кийин дароо бөлмөнүн полуна түшүп жатканын көрүүгө болот. Андан ары, оң дубалга жетип, ал андан чагылдырылат жана андан кийин бөлмөнүн арткы дубалында жайгашкан чыгууга барат. 9-схеманы колдонууда аба жашынын максималдуу мааниси 8-схемадан 1.265 эсе аз. Же желдетүүнүн 9-схемасы бөлмөнүн желдетилишин 8-схемага салыштырмалуу 21% жакшыртат деп айта алабыз.

Ошондой эле желдетүү процессин 1-схеманы жана 9-схеманы колдонуу менен кирүүчү тешиктин борборунун ар кандай бийиктикте жайгаштырууда 9-схема 1-схема менен салыштырганда бөлмөнүн желдетилишин 73.3%га жакшыртууну камсыздай тургандыгы аныкталган (3.39-сүрөттү караңыз).



3.39-сүрөт – 1-схеманы 9-схема менен салыштыруу

Төмөнкү 3.40-сүрөттө тиешелүү түрдө  $y=1.5\text{ м}$  (3.40а-сүрөт),  $x=2.0\text{ м}$  (3.40б-сүрөт) жана  $z=1.3\text{ м}$  (3.40в-сүрөт) тегиздиктеги аба жашынын талаасы көрсөтүлгөн.

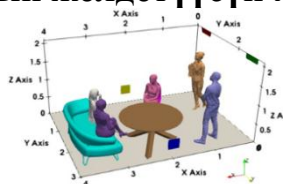


3.40-сүрөт – Аба жашынын ар түрдүү кесилиштердеги талаалары.

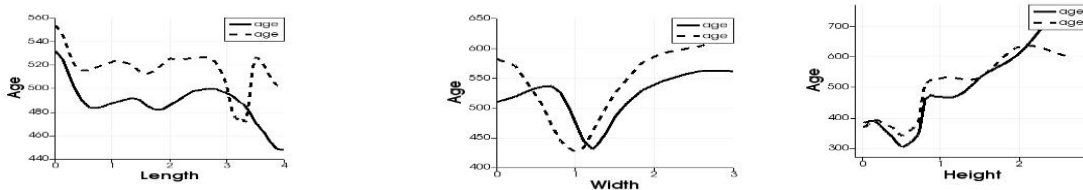
Сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыгы көрсөткөндөй, каралып жаткан 9 желдетүү схемасынын ичинен 9-схема  $z = 1.5\text{ м}$  бийиктикке чейин жана 2.2 м ге чейинки узундукта кафедранын эң жакшы желдетилишин камсыздайт.

### Беш кызматкерден турган кафедранын желдетүүсүн моделдөө.

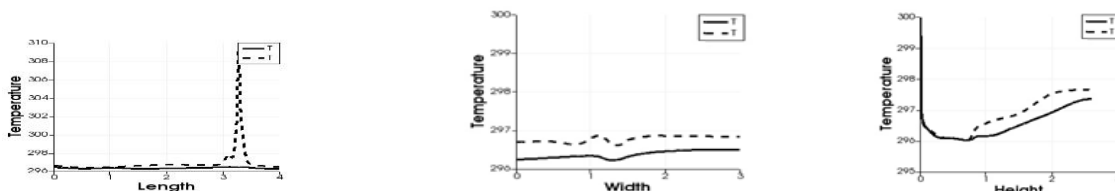
3.41-сүрөт. 5 кызматкерден турган кафедранын модели.



3.42 жана 3.43-сүрөттөрдө кафедранын геометриялык борбору аркылуу өткөн сызыктар боюнча (сол жакта  $Ox$  огуна, борбордо  $Oy$  огуна жана оңдо  $Oz$  огуна параллель) абанын жашынын жана температурасынын профилдери көрсөтүлгөн.



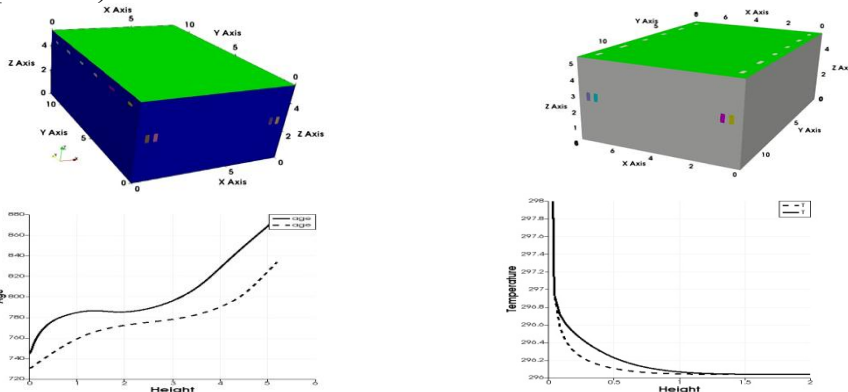
3.42-сүрөт. Абанын жашынын профили



3.43-сүрөт. Абанын температурасынын профили

Бул жерде температуранын эки чектик шарттарын салыштыруу келтирилген. Чекиттүү сызык температуранын туруктуу маанисин, ал эми түз сызык нөлдүк градиентин билдирет. Көрүнүп тургандай, эгерде кафедранын дубалдарына жана шыптарына адиабаттык шарт камсыздалса, анда кафедранын желдетилиши 11.53% жакшырат (1 м бийиктикте, 3.42-сүрөттү караңыз, ондо), ал эми абанын температурасы кафедранын дубалдарына, шыбына жана кызматкерлердин денелерине температуранын туруктуу мааниси берилген учурга салыштырмалуу төмөндөйт.

Андан ары Лекциялык залдын желдетүү процессинин сандык моделдөөсү жүргүзүлдү. Залдын узундугу  $L=12\text{м}$ , бийиктиги  $H=5.2\text{м}$ , туурасы  $W=8\text{м}$  (3.44-сүрөттү караңыз.)



3.44-сүрөт. Желдетүү схемалары (жогоруда) жана абанын жашы (төмөнкү солдо) жана температура (төмөнкү оңдо) профилдери

Бул жерде, чекиттүү сызык каптал дубалдарда жайгашкан кириш чектерге, түз сызык лекция залынын шыбында жайгашкан кириш чектерге туура келет. Кириш чектер каптал дубалдарда жайгашканда желдетүү экинчи учурга салыштырмалуу 3.7% жакшырганын көрүүгө болот.

## КОРУТУНДУ

Диссертациялык иштин негизги натыйжалары жана корутундулары болуп төмөнкүлөр саналат:

1. OpenFOAM пакетинин алкагында табигый конвекция (калкыма), желдетүү жана жылуулук нурдануу кубулуштарын эске алуу менен газдын турбуленттүү агымдарын сандык моделдөөнүн учурдагы ыкмаларын аналитикалык серепти жүргүзүү менен аларды жакшыртуунун мүмкүн болгон жолдору аныкталды.

2. OpenFOAM8 пакетинин колдонуучусунун колдонмосуна ылайык эсептөө областынын чектерин башкадан кайра аныктоо жана төмөнкү релаксациянын ылайыктуу коэффициенттерин колдонуу аркылуу OpenFOAM8 пакетинин модификацияланган `buoyantSimpleFoam` чечүүчүсү иштелип чыккан.

3. Модификацияланган `buoyantSimpleFoam` чечүүчүсү ар кандай аспект катышы бар көндөйлөрдөгү турбуленттүү агымдардын эсептөөлөрүнүн натыйжаларын башка авторлордун тиешелүү эсептелинген жана эксперименталдык берилгендери менен салыштыруу аркылуу текшерилген. Ылдамдык, температура жана турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясы сыяктуу агымдын мүнөздөмөлөрү үчүн модификацияланган чечүүчүнүн жардамы менен алынган сандык натыйжалар учурдагы окшон ыкмалардын тактыгынан кыйла ашып тургандыгы көрсөтүлгөн.

4. Бөлмөнүн моделин бөлмөнүн полу аркылуу жылытуу да сан жагынан негизделип сунушталды, бул бөлмөнүн моделинин бурчунда жылуулук булагынын жергиликтүү жайгашкан жерине салыштырмалуу бөлмөнүн ичиндеги абанын олуттуу бирдей жылытылышына алып келет.

5. Стационардык эмес маселеде орточо температуранын жана орточо ылдамдыктын талааларына орточо температура үчүн ар кандай чек ара шарттарынын таасири сандык жактан изилденген. Болжол менен 150 с убакыттын ичинде табигый конвекциянын кубулушун (калкыма) таасири нөлгө чейин төмөндөй тургандыгы жана башка чек ара шарттарга салыштырмалуу адиабаттык чек ара шарттарында (500 с жакын) температуранын бирдей бөлүштүрүлүшү алда канча эрте жетээри көрсөтүлгөн.

6. Биринчи жолу жалпы физика жана физиканы окутуунун усулу кафедрасынын имараттарынын комфорттук шарттарына ар кандай желдетүү схемаларынын таасири сандык түрдө изилденген. Бөлмөнүн көпчүлүк бөлүгүндө эң жакшы комфорт шарттарын камсыз кылууга мүмкүндүк берген эки кирүүчү жана эки чыгышы бар симметриялык желдетүү схемасын колдонуу сан жагынан негизделди.

7. Табигый конвекцияны (калкыманы) эсепке алуу менен лекциялык залдын желдетүүсүн моделдештирүү биринчи жолу аткарылып, каптал дубалдар аркылуу лекциялык залды желдетүүнү уюштуруу, аны шып аркылуу уюштурууга салыштырмалуу таза абанын алмашуусун жакшырттары көрсөтүлдү.

## **ПРАКТИКАЛЫК СУНУШТАР**

Изилдөөнүн жыйынтыктары Кыргыз Республикасынын Министрлер Кабинетине караштуу Архитектура, курулуш жана турак жай коммуналдык чарба мамлекеттик агенттигинин ишмердүүлүгүнө киргизилди.

Диссертациялык материалдардын бир бөлүгү ОшМУнун Математика жана маалыматтык технологиялар факультетинин окуу процессине 510100 Математика, 510200 Колдонмо математика жана информатика адистиктеринин жогорку курстарынын студенттери, магистранттары жана аспиранттары үчүн «Теориялык механика» сабагына киргизилген.

Бул иш студенттерге заманбап программалык пакеттерди жана маалыматтык технологияларды колдонуу менен илим менен техниканын актуалдуу маселелерин чечүү көндүмдөрүн өздөштүрүүгө мүмкүндүк берет.

Ишти андан ары өнүктүрүү максатында учурдагы математикалык моделдөө илиминин актуалдуу проблемалары болуп саналган төмөнкү маселерди карап чыгуу керек:

- Тышкы чөйрө менен жылуулук алмашууну эске алуу менен бөлмөнүн моделинде турбуленттүү агымдарды эсептөө.
- Бөлмөдөгү толук жылуулук алмашуу аркылуу жылуулук комфорттун эсептөө.

## **ДИССЕРТАЦИЯНЫН ТЕМАСЫ БОЮНЧА ЖАРЫЯЛАНГАН ЭМГЕКТЕРДИН ТИЗМЕСИ**

**1. Калбекова, М. Ж.** Моделирование естественной конвекции в воздушных полостях [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, М. Ж. Калбекова // Известия ОшГУ: научно-технический журнал. – № 1. – Ош, 2018. – С. 113-121.

<https://elibrary.ru/item.asp?id=37351802>

**2. Калбекова, М. Ж.** Идеология пакета Open Foam и принцип построения задачи [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, Г. А. Калдыбаева, С. С. Акназарова, М. Ж. Калбекова // Проблемы оптимизации сложных систем, материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара. – Алматы, 2018. – С. 5-12.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37014674>

**3. Калбекова, М. Ж.** Моделирование осесимметричного струйного течения [Текст] / З. К. Абдимуталипова, А. Ы. Курбаналиев, Г. К. Сулайманова, М. Ж. Калбекова // Проблемы оптимизации сложных систем, материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара. – Алматы, 2018. – С. 68-72.

<https://elibrary.ru/item.asp?id=37014603&pff=1>

**4. Калбекова, М. Ж.** Моделирование турбулентной естественной конвекции в квадратной каверне [Текст] / С. С. Акназарова, М. Ж. Калбекова // Известия кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова. – № 3(47) – Бишкек, 2018. – С. 435-443. – **IF 0,143.**

<https://elibrary.ru/item.asp?id=36329021>

**5. Калбекова, М. Ж.** Численное моделирование естественного конвективного течения в воздушных полостях [Текст] / М. Ж. Калбекова, А. Ы. Курбаналиев, А. Ж. Жайнаков // Проблемы оптимизации сложных систем, труды XV Международной Азиатской школы-семинара. – Новосибирск, 2019. – С. 33-38. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41540166&pff=1>

**6. Калбекова, М. Ж.** Мультифизическое моделирование процесса теплопроводности [Текст] / М. Ж. Калбекова, Т. Б. Марс кызы, А. Ормош кызы, А. Т. Калмурзаева // Вестник Ошского государственного университета. – Ош, 2021. – Том 1. – №1. – С.136-143. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46561757>

**7. Kalbekova, M. Zh.** Critical reviewing of OpenFOAM buoyantcavity tutorial [Electronic resource] / A. Y. Kurbanaliev, M. Zh. Kalbekova, A. T. Kalmurzaeva, A. T. Dyikanova // AIP Conference Proceedings 2402, 2009. – 2021. – Doi 10.1063/5.0071571. (Scopus)

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57360262800>

**8. Kalbekova, M. Zh.** Numerical simulation of nonstationary laminar flow around a circular cylinder. [Electronic resource] / A. Y. Kurbanaliev, A. T. Kalmurzaeva, M. Zh. Kalbekova, A. T. Dyikanova, N. A. Amankulova // AIP Conference Proceedings 2402, 070055. – 2021. – Doi 10.1063/5.0071578. (Scopus)

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57360262800>

**9. Калбекова, М. Ж.** Моделирование турбулентной естественной конвекции в прямоугольных полостях [Текст] / М. Ж. Калбекова, А. Ы. Курбаналиев // Горный журнал Кыргызского государственного университета геологии, горного дела и освоения природных ресурсов имени академика У. Асаналиева. – Том 1. – Бишкек, 2021. – С. 83-89.

<https://elibrary.ru/item.asp?id=47387111>

**10. Калбекова, М.Ж.** Квадраттык турбуленттүү конвекцияны моделдештирүү Моделирование квадратной турбулентной конвекции [Текст] // М. Ж. Калбекова // Вестник ОшГУ. – Ош, 2022. – № 1. – С. 177-184.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48614399>

**11. Калбекова, М. Ж.** Моделирование естественной конвекции в прямоугольной полости с учетом радиационного излучения в пакете OpenFOAM [Электронный ресурс] / М. Ж. Калбекова, А. Ы. Курбаналиев // Вестник ОшГУ, серия “Математика, физика, техника”. – Ош, 2022. – №1. – С. 67-80.

<https://journal.oshsu.kg/index.php/mpht/article/view/253>

**12. Калбекова, М.Ж.** Программа для моделирования течения в двумерной каверне на основе проекционного метода. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова // Кыргызпатент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 22.10.2020г. №639.

**13. Калбекова, М.Ж.** Программа для численного решения уравнений Навье-Стокса в двумерном приближении. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова, Т. Марс кызы // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. №672, 25.02.2021.

**14. Калбекова, М.Ж.** Программа для подготовки данных для моделирования естественной конвекции в прямоугольной каверне в пакете OpenFOAM. [Текст] // А. Ы. Курбаналиев, М. Ж. Калбекова, А. Т. Калмурзаева // Кыргызпатент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 15.04.2022г. №742.

## РЕЗЮМЕ

диссертационной работы Калбековой Махбурат Жамшитбековны на тему:  
**«Численное моделирование турбулентных течений с учетом эффекта плавучести» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы**

**Ключевые слова:** турбулентность, рециркуляционные зоны, нестационарность, естественной конвекции (плавучесть), теплопередача, теплового излучения, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Объект исследования:** пространственные турбулентные нестационарные внутренние течения с зонами рециркуляции с учетом эффектов естественной конвекции (плавучести) и теплового излучения.

**Предметом исследования** является численное исследование влияния эффекта естественной конвекции (плавучести) на эргономику термальной среды помещения.

**Цель исследования** заключается в усовершенствовании модели, способной моделировать турбулентные течения газа с учётом эффектов естественной конвекции (плавучести), вентиляции и теплового излучения в рамках пакета OpenFOAM.

**Методы исследования и аппаратура.** Численное интегрирование стационарных и нестационарных, осредненных по Рейнольдсу трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих турбулентные течения с учетом эффекта естественной конвекции (плавучести).

### **Научная новизна полученных результатов работы:**

• Установлены удовлетворительные согласия расчетных данных профилей температуры и вертикальной составляющей скорости с экспериментом при моделировании каверны с аспектным отношением 28.6:1. Показано, что увеличение числа Рэлея от  $Ra=8.6 \times 10^5$  до  $Ra=1.43 \times 10^6$  приводит к ухудшению точности согласия на 0.6%. • Показано, что моделирование конвекции в каверне с аспектным отношением 5:1 сравнение профилей средних характеристик течения с экспериментом около холодных и горячих стенок дает максимальные ошибки отклонения в пределах 1.9 %, 3.5 %, 2.6 % и 1.3 %, 2.2 %, 1.7 % соответственно. • Впервые проведен численный расчет теплового комфорта в помещении кафедры Общей физики и МПФ. Обнаружено, что уменьшение вертикальной координаты входной границы до  $z=0.5$ м приводит к увеличению возраста воздуха в точке ( $x=2$ ,  $y=1.5$ ,  $z=1$ м) более чем в два раза.

**Степень использования или рекомендации по использованию.** Результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования нагрева и охлаждения помещения за счет естественной конвекции.

**Область применения.** Результаты исследования включены в деятельность в деятельность Государственного агентства архитектуры, строительства и жилищно-коммунального хозяйства при кабинете Министров Кыргызской Республики.

**Калбекова Махбурат Жамшитбековна 01.02.05 – суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын изденип алуу үчүн жазылган «Турбуленттик агымдарды калкыма кубулушун эске алуу менен сандык моделдештирүү» аттуу диссертациялык ишинин РЕЗЮМЕСИ**

**Ачкыч сөздөр:** турбуленттүүлүк, рециркуляциялык зоналар, стационардык эмес, калкымалуулук, жылуулук өткөрүмдүүлүк, жылуулук нурдануу, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Изилдөөнүн объектиси:** табигый конвекция (калкыма), желдетүү жана жылуулук нурдануу кубулуштарын эске алуу менен рециркуляция зоналары бар мейкиндиктеги турбуленттүү туруксуз ички агымдар.

**Изилдөөнүн предмети:** бөлмөнүн жылуулук чөйрөсүнүн эргономикасына табигый конвекция (калкыма) кубулушунун тийгизген таасирин сандык изилдөө болуп саналат.

**Изилдөөнүн максаты** - OpenFOAM пакетинин алкагында газдын турбуленттүү агымдарын табигый конвекциянын (калкыманын), желдетүүнүн жана жылуулук нурдануунун таасирин эске алуу менен моделдештирүүгө жөндөмдүү моделин өркүндөтүү болуп саналат.

**Изилдөө ыкмалары жана жабдуулар:** табигый конвекция (калкыма) кубулушун эске алуу менен турбуленттүү агымдарды мүнөздөгөн стационардык жана стационардык эмес, Рейнольдс боюнча орточолонгон Навье-Стокстун үч өлчөмдүү теңдемелеринин сандык интегралдоо.

**Иштин алынган натыйжаларынын илимий жаңылыгы.**

- 28.6:1 аспекттик катыштагы кавернаны моделдөөдө температуранын жана ылдамдыктын вертикалдык компонентинин эсептөөдө алынган профилдери менен эксперименттин ортосунда канааттандырарлык дал келүүчүлүк аныкталды. Рэлейдин санынын маанилери  $Ra=8.6 \cdot 10^5$  тен  $Ra=1.43 \cdot 10^6$  га көбөйүшү сандык маалыматтар менен эксперименттин ортосундагы айырманын 0.6% ке өсүшүнө алып келери көрсөтүлдү.
- 5:1 аспекттик катыштагы кавернадагы конвекцияны моделдөө, эксперимент менен орточо агымдын муздак жана ысык дубалдардын жанындагы мүнөздөмөлөрүнүн профилдерин салыштыруу максималдуу каталыктардын тиешелүү түрдө 1.9%, 3.5%, 2.6% жана 1.3%, 2.2 %, 1.7% чегинде болушу көрсөтүлдү.
- ОшМУнун Жалпы физика жана ФОУ кафедрасында комфорттук шарттарын сандык эсептөө биринчи жолу жүргүзүлдү. Кирүүчү чек арасынын вертикалдык координатын  $z=0.5$ мге чейин азайтуу ( $x=2, y=1.5, z=1$ м) чекитиндеги абанын жашынын  $z=2$ м учуруна салыштырмалуу эки эседен ашык өсүшүнө алып келери аныкталды.

**Колдонуу даражасы же колдонуу боюнча сунуштар.** Изилдөөнүн жыйынтыктары табигый конвекция аркылуу бөлмөнү жылытууну жана муздатууну болжолдоо үчүн колдонулушу мүмкүн.



**Колдонуу чөйрөсү.** Изилдөөнүн жыйынтыгы Кыргыз Республикасынын Министрлер Кабинетине караштуу Архитектура, курулуш жана турак жай-коммуналдык чарба мамлекеттик агенттигинин ишмердүүлүгүнө киргизилди.

## SUMMARY

**dissertation work "Numerical modeling of turbulent flows taking into account the effect of buoyancy" of Kalbekova Makhburat Zhamshitbekovna is submitted for the scientific degree of candidate of physical-mathematical sciences by the specialty 01.02.05 – mechanics of fluid, gas and plasma**

**Keywords:** turbulence, recirculation zones, unsteadiness, buoyancy, heat transfer, radiative heat transfer, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Object of research:** spatial turbulent unsteady internal flows with recirculation zones taking into account the effects of buoyancy and radiative heat transfer.

**The subject of the study** is a numerical study of the effect of the buoyancy effect on the ergonomics of the thermal environment of the room.

**The purpose of the dissertation** is to improve the model capable of simulating non-isothermal turbulent gas flows, taking into account the effects of buoyancy and radiative heat transfer within the framework of the OpenFOAM package.

**Research methods and equipment.** Numerical integration of stationary and non-stationary, Reynolds-averaged 3D Navier-Stokes equations describing turbulent flows taking into account the buoyancy effect by the control volume method.

### **Scientific novelty of the obtained results of the work.**

• Satisfactory agreement between the calculated data of temperature profiles and the vertical component of velocity with the experiment in modeling a cavity with an aspect ratio of 28.6:1 has been established. However, an increase in the Rayleigh number from  $Ra=8.6 \times 10^5$  to  $Ra=1.43 \times 10^6$  leads to a deterioration in the accuracy of fit by 0.6%. • It is shown that the simulation of convection in the cavity with an aspect ratio of 5:1, comparing the profiles of the average flow characteristics with the experiment near the cold and hot walls, gives the maximum deviation errors within 1.9%, 3.5%, 2.6% and 1.3%, 2.2%, 1.7% respectively. • For the first time, a numerical calculation of thermal comfort in the premises of the Department of General Physics and MPF was carried out. It was found that a decrease in the vertical coordinate of the inlet boundary to  $z=0.5\text{m}$  leads to an increase in the air age at the point ( $x=2$ ,  $y=1.5$ ,  $z=1\text{m}$ ) by more than two times.

**Degree of use or recommendations for use.** The results of the study can be used to predict the heating and cooling of the room due to natural convection.

**Scope of application.** The results of the study are included in the activities of the State Agency for Architecture, Construction and Housing and Communal Services under the Cabinet of Ministers of the Kyrgyz Republic.

