

**И. Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик  
техникалык университети  
Б. Ельцин атындагы Кыргыз-Россия Славян  
университети**

Д 01.22.652 Диссертациялык кеңеши

Кол жазма укугунда  
**УДК 51963**

**Абдимуталипова Зейнура Каныбековна**

**Чубурган турбуленттик агымдарды сандык моделдештирүү**

01. 02.05 – суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги

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

**Бишкек-2024**

Диссертациялык иш Ош мамлекеттик университетинин эксперименталдык жана теориялык физика кафедрасында аткарылды

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

Расмий оппоненттери: Бийбосунов Алмаз Ильясович, физика-математика илимдеринин доктору, профессор, «Газпром Дизайн» ЖЧКсынын Кыргыз Республикасындагы өкүлчүлүгүнүн директору

Исабеков Кубатбек Абдыкеримович физика-математика илимдеринин кандидаты, К.Тыныстанов атындагы Ысык-Көл мамлекеттик университетинин математика, информатика жана билим берүү технологиялары кафедрасынын доценти

Жетектөөчү мекеме: К.И.Сатпаев атындагы Казак улуттук изилдөө техникалык университети. Дареги: Казакстан Республикасы, 050043, Алматы ш., Сатпаев көч.22

Диссертация 2024-жылдын 14-июнунда саат 14:00дө И.Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин жана Б.Ельцин атындагы Кыргыз-Орус Славян университетинин алдындагы физика-математика илимдеринин доктору (кандидаты) окумуштуулук даражасын изденип алуу үчүн жазылган диссертацияларды коргоо боюнча түзүлгөн Д 01.22.652 диссертациялык кеңешинин отурумунда корголот. Дареги: 720044, Бишкек ш., Ч.Айтматов пр., 66, КАЗ, кабинет 1/257).

Диссертацияны коргоо боюнча видеоконференцияга кирүү шилтемеси: <https://vc.vak.kg/b/012-scz-oh6-lwn>

Диссертациялык иш менен И.Раззаков атандагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин (720044, Бишкек ш., Ч.Айтматов пр., 66) жана Б.Ельцин атындагы Кыргыз-Орус Славян университетинин (720000, Бишкек ш., Киев көч., 44) илимий китепканаларынан таанышууга болот. Авторефераттын жана диссертациялык иштин толук текстти [www.vak.kg](http://www.vak.kg) сайтына жүктөлгөн.

Автореферат 2024-жылдын 13-майында таркатылды.

Диссертациялык кеңештин окумуштуу катчысы, физика-математика илимдеринин кандидаты, доцент



Т.Т.Кожошев

## **ИЗИЛДӨӨНҮН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ**

**Диссертациянын темасынын актуалдуулугу.** Учурда эң актуалдуу болуп абанын алмашуусун аныктоо жана абанын бөлүштүрүлүшүн чубурган агымдардын мыйзам ченемдүүлүктөрүнүн, жылуулук жана масса алмашуу процесстеринин болжолдуу математикалык моделдеринин негизинде комплекстүү чечүү принциби болуп саналат. Желдетилген бөлмөдө ылдамдык жана температуралык талаалардын пайда болуу закон ченемдүүлүктөрүн аныктоо үчүн компьютерде сандык ыкмаларды колдонуу менен теңдемелер системасын чечүүнүн натыйжалары, анын ичинде Навье-Стокс теңдемеси, энергия, масса алмашуу жана турбуленттик кинетикалык энергиянын диссипациясы колдонулган.

Турбуленттик струялык агымдын теориясынын негиздери Г.Н. Абрамович (2011), И.А.Белов (2001), А.С.Гиневский (1969), Д. Купер (1993), П.К.Фрик (2003), А.А. Юнг (2010) сыяктуу окумуштуулардын эмгектеринде орун алган.

Бул иште жылуулук өткөрүүнү эске алуу менен оорукананын бөлмөсүнүн желдетүү процессине терс басым үчүн чыгуучу чек ара шарттын таасири изилденет. Жогоруда айтылгандар диссертациянын актуалдуулугун тастыктайт.

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

**Изилдөөнүн максаты** – OpenFOAM тиркемесинин алкагында Кара-Суу аймактык ооруканасынын инфекциялык бөлмөсүн желдетүү мисалында турбуленттүү чубурган агымдарды моделдөө ыкмасын иштеп чыгуу болуп саналат.

**Бул максатка жетүү үчүн төмөнкү маселелер чечилди:**

1. турбуленттүү чубурган агымдарды сандык моделдөөнүн колдонуудагы ыкмаларына аналитикалык кароо жүргүзүү жана аларды андан ары өркүндөтүүнүн мүмкүн болгон жолдорун аныктоо;
2. дубалга жакынкы турбуленттик агымды сандык моделдөө аркылуу колдонулган математикалык моделдин адекваттуулугун текшерүү;
3. жылытуу пластинкасын муздатууга түшкөн турбуленттик урунуунун Рейнольдс санынын таасирин моделдөө;
4. кирүүчү агымдын турбуленттүүлүгүнүн интенсивдүүлүгүнүн бөлмө моделинин желдетүү процессине тийгизген таасирин моделдөө;
5. жылуулук берүүнү эске алуу менен Кара-Суу аймактык ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлмөсүнүн моделинин желдетүү процессине терс басым үчүн чыгуучу чек ара шарттын таасирин моделдөө.

**Иштин алынган натыйжаларынын илимий жаңылыгы.**

- Жылытуу пластинасын муздатуу процессин моделдештирүүдө сокку уруучу агымдын Рейнольдс саны 8000ден 48000ге чейин көбөйөт, алдын ала аныкталган тактыктагы сандык эсептөөлөрдүн эсептөө эффективдүүлүгү жогорулайт, тактап айтканда, кайталоолордун саны 27,93%га азаят жана эсептөө убактысы buoyantkEpsilon турбуленттүүлүгү модели үчүн 27,82% га төмөндөйт.

- Мындан сырткары, сандык моделдөө эсептик аймактын орто горизонталдык тегиздигинде агымдын температурасынын бирдей эмес бөлүштүрүлүшү аныкталды.

- $3 \times 1 \times 1$  жана  $9 \times 3 \times 1$  өлчөмдүү бөлмөнүн моделдердеги агымдардын геометриялык жактан окшош эки вертикалдык кесилишинде окшоштугу алынды. k- $\omega$  SST модели үчүн эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк 5% интенсивдүүлүктө эң начар экендиги көрсөтүлгөн.

- Алгачкы жолу Кара-Суу аймактык ооруканасында жугуштуу оорулар бөлмөсүн желдетүүнү уюштурууда терс басымдагы чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Орточо ылдамдык профили -8Па жана -16Па терс чыгуу басымында нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтаптан турган жугуштуу оорулар палата үчүн сунушталган желдетүү схемасы талап кылынган ыңгайлуулукту камсыздай тургандыгы көрсөтүлгөн - ылдамдыгы 0,2 м/с ашпайт.

#### **Алынган натыйжалардын практикалык мааниси.**

Диссертациялык ишти аткарууда алынган натыйжалар турбуленттүү чубурган агымдарды математикалык моделдөө ыкмасына белгилүү өлчөмдө салым кошушат. Изилдөөнүн жыйынтыгы Кара-Суу аймактык ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлүмүнүн желдетүү ишмердүүлүгү боюнча киргизилди.

Ошондой эле алынган жыйынтыктарды магистранттар, жогорку курстун студенттери жана тийиштүү адистиктердин аспиранттары үчүн атайын курс катары окуу процессинде пайдаланууга болот.

#### **Диссертациянын коргоого коюлуучу негизги жоболору:**

- дубалдын(тегиз беттеги) агымын моделдөөнүн жана жылытуу плитасын муздатуунун натыйжалары;
- оорукананын жугуштуу оорулар бөлүмүндө струялык агымды моделдөөнүн натыйжалары.

**Илимий жоболордун, натыйжалардын (тыянактардын) жана сунуштоолордун ырастыгы (төмөндөгүлөр менен) тастыкталат (камсыздалат):** маселенин туура коюлушу, математикалык моделдөө жана программалоо ыкмаларын, сандык методдорду негиздүү пайдалануу, заманбап компьютердик системанын жетишкендиктери, жүргүзүлгөн эсептөө эксперименттеринин жетиштүү көлөмү жана алынган сандык натыйжаларды жана тиешелүү эксперименттик жана эсептелген маалыматтарды салыштыруу.

**Издөнүүчүнүн жеке салымы.** Диссертациялык иш изденүүчү тарабынан жүргүзүлгөн өз алдынча изилдөөнүн натыйжасы болуп саналат. Автордун жеке салымы эмгектин максатын коюу жана аны аныктоо, максатка жетүү ыкмаларын тандоо, изилдөө жүргүзүү, алынган натыйжаларды талдоо жана корутундуларды түзүү, макалаларды жарыялоодон турат.

**Изилдөө натыйжаларын апробациялоо.** Диссертациялык изилдөөнү жүргүзүүдө алынган натыйжалар төмөнкү эл аралык жана республикалык конференцияларда жана семинарларда баяндалган:

- XIV-XV Эл аралык азиялык мектеп-семинар “Татаал системаларды оптималдаштыруу маселелери”( Казакстан Республикасы Алматы, 2018, Россия, Новосибирск, 2019).

- XVII Эл аралык азиялык мектеп-семинар “Татаал системаларды оптималдаштыруу маселелери” (Россия, Новосибирск, 2021).

- Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги, профессор, физика-математика илимдеринин доктору, Жайнаков Аманбектин 80 жылдыгына арналган “Илимдеги жана тоо-кен билиминдеги маалыматтык технологиялар жана математикалык моделдөө” эл аралык илимий конференциясы(Кыргыз Республикасы, Бишкек, 2021).

- Н.Исанова атындагы КМКТАУнун Жаңы маалыматтык технологиялар институтунун 20 жылдыгына арналган «Илимий-техникалык жана билим берүү мейкиндигиндеги маалыматтык технологиялар» IV Эл аралык илимий-практикалык конференциясы (Кыргыз Республикасы, Бишкек, 2021).

- «Кыргызстандын PhD докторантурасын жана илимий потенциалын өнүктүрүү» илимий-практикалык конференциясы (Кыргыз Республикасы, Бишкек, 2022).

- Техника илимдеринин доктору, профессор Багдаулет Кенжалиевдин 75 жылдыгына арналган “Илимдин чакырыктары” эл аралык практикалык конференциясы( Казакстан Республикасы, Алматы, 2023).

**Диссертациянын жыйынтыктарынын басылмаларда чагылдырылышынын толуктугу.**

Изилдөөнүн негизги жыйынтыктары 11 илимий макалада жана 2 автордук күбөлүктө, анын ичинде, Скопус (2), РИНЦ (3), IF -0.173(1) маалымат базасына кирген Кыргыз Республикасынан тышкары илимий басылмаларда жарык көргөн.

**Диссертациянын структурасы жана көлөмү.** Диссертация киришүүдөн, 3 баптан, корутундудан, практикалык сунуштоолордон, библиографиялык тизмеден жана тиркемелерден турат. Эмгекте \_\_ барак текст, \_\_ сүрөт, \_\_ таблица, \_\_ библиографиялык шилтеме жана \_\_ колдонмолор бар.

## **ДИССЕРТАЦИЯНЫН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ**

**Киришүүдө** теманын актуалдуулугу негизделип, изилденип жаткан маселенин коюлушу, изилдөөнүн максаттары жана милдеттери калыптандырылып, эмгектин илимий жаңылыгы жана практикалык мааниси

көрсөтүлдү. Кысылбоочу суюктуктун агымдарын, алардын артыкчылыктарын жана кемчиликтерин моделдөөдө азыркы маселелер талкууланат. Диссертациянын түзүлүшү жана негизги мазмуну бөлүмдөр боюнча кыскача баяндалды.

**“Адабияттарды”** деп аталган биринчи бапта изилдөөгө байланыштуу илимий булактарды карап чыгуу менен турбуленттүү струялык агымдарын моделдөөнүн заманбап усулдары каралган. Диссертациянын темасы менен байланышкан башка авторлордун изилдөө натыйжалары жана жеткиликтүү илимий адабияттар сыпатталган.

**«Методология жана изилдөө ыкмалары»** деп аталган экинчи бапта турбуленттүүлүктүн моделдери жана OpenFOAM пакетинин чектеринде, контролдук көлөмдөрдүн ыкмаларынын негизинде жалпыланган өзгөрмөлүүлүк үчүн ташуунун жалпыланган теңдемесин дискретизациялоо ыкмалары каралды.

**Изилдөөнүн объектиси** - турбуленттүү струялык агым.

**Изилдөөнүн предмети**- Кара-Суу аймактык ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлүмүнүн бөлмөсүндө аргасыз конвекциянын таасиринин сандык изилдөөсү.

Каралып жаткан стационардык эмес маселенин математикалык модели Навье-Стокс теңдемелеринин системасына негизделген, ал үзгүлтүксүздүк, импульстун өтүү жана энтальпия теңдемелерин камтыйт:

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

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho g \beta (T - T_{ref}) + \nabla \cdot \left( 2\mu_{eff} D(\mathbf{u}) - \nabla \cdot \left( \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) \right) \quad (2)$$

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

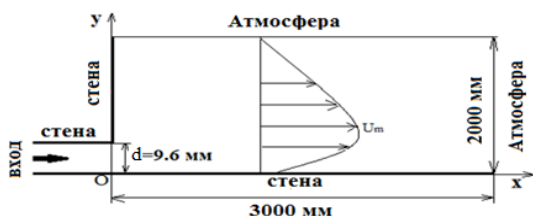
$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT ; \mu_{eff} = \mu + \mu_t ; \mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon ; \quad (4)$$

**“Чубурган турбуленттик агымдардын сандык модели”** деп аталган үчүнчү бапта OpenFOAM пакетинин алкагында алынган изилдөөлөрдүн натыйжалары берилген.

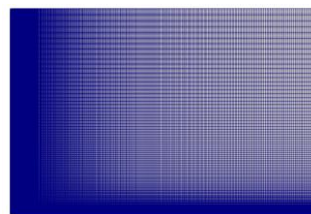
**1-маселе. Тегиз беттеги чубурган турбуленттүү агымды сандык моделдөө.**

Бул стационардык эмес маселенин максаты турбуленттүү дубал бетиндеги агымынын ылдамдык талааларын сандык жактан изилдөө болуп саналат.

**Маселенин коюлушу.** Бул маселеде дубалга жакын жайгашкан жалпак турбуленттүү струялык агымдын математикалык моделдөөсү каралат. Алынган сандык эсептөөлөр Eriksson, J.G., Karlsson, R.I., Persson, J. (1998) эксперименталдык иштеринин маалыматтары менен салыштырылат, ERCOFTAC турбуленттүү агымдардын классикалык коллекциялык маалымат базасынан алынган. Моделдештирилген маселенин схемасы жана масштабын сактабастан, эсептөө чөйрөсүнүн чек аралары жана эсептөө торчолору тиешелүүлүгүнө жараша 3.1 жана 3.2-сүрөттөрүндө көрсөтүлгөн.



3.1-сүрөт . Маселенин геометриясы жана аймактын чек аралары



3.2-сүрөт. Эсептөө сеткасы

Болжолдуу узундугу  $l=3$  м, туурасы  $2$  м жана тегиздиктеги суу агымы агып чыккан түтүктүн бийиктиги  $9,6$  мм. Кирүүчү узунунан ылдамдыктын орточо мааниси аркылуу аныкталуучу Рейнольдс саны  $U_0=1$  м/с, суунун кинематикалык илешкектүүлүгүнүн коэффициенти  $\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с бийиктиги  $d=0,0096$  м барабар.  $Re = \frac{U_0 d}{\nu}$ .

Маселенин математикалык модели kOmegaSST турбуленттик модели менен толукталган (1-2) теңдемелерге негизделген.

**Сандык модель.** Эсептөө домени контролдук көлөмү ыкмасын колдонуу менен дискретизацияланган.

Экспериментте чек ара катмарын чечүү жана турбуленттүүлүк деңгээли жөнүндө маалымат алуу үчүн кириш ылдамдык профилдинин төмөнкү бөлүгүнүн ылдамдык профилдери өлчөндү.  $U=0,99 U_{max}$  катары аныкталган чек ара катмарынын калыңдыгы  $1,4$  мм. Профильдин тегиз бөлүгүндө турбуленттүүлүктүн интенсивдүүлүгү  $1\%$ тен аз.

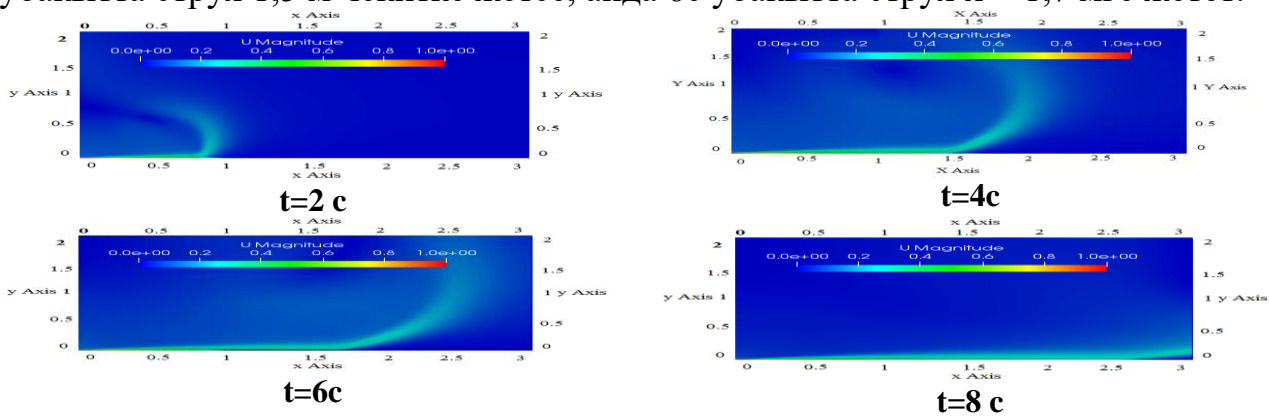
Суу жылчыктан орточо  $u_0 = 1$  м/с ылдамдыкта чыгат. 3.1-сүрөттө "атмосфера" деп белгиленген жогорку чекте газ-динамикалык функциялар үчүн жалпы басым шарты коюлган. Басым үчүн шарттар кирүүчү чекке окшош. Эсептөө аймагынын дубалдарында ылдамдык үчүн тайгаланбоо шарты (тездик  $0$  м/с), басым үчүн нөлдүк градиент шарты көрсөтүлгөн. Маселе эки өлчөмдүү болгондуктан, алдынкы "алдынкы" жана арткы "арткы" чектер үчүн атайын OpenFOAM "бош" чектик шарты колдонулат. Бул шарт берилген багыт боюнча эсептөөлөр жүргүзүлбөгөн учурларда коюлат.

Кириштеги турбуленттик кинетикалык энергиясы  $k_{кир} = 1,5(u_0)^2 = 0,00015$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>,  $\omega_{inlet} = \varepsilon_{inlet} / k_{inlet} = 2,08$  с<sup>-1</sup> жана тиешелүү диссипация ылдамдыгы  $\varepsilon_{inlet} = (C\mu)^{0,75} (k_{inlet})^{1,5} / L = 0,093$  м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>, мында  $L$  – турбуленттик узундуктун шкаласы, жылчыктын бийиктигине карата алынган.

(1-4) теңдемелерди дискретизациялоонун натыйжасында алынган сызыктуу алгебралык теңдемелердин системасы төмөнкү релаксация ыкмасын колдонуу менен белгилүү SIMPLE алгоритмин колдонуу менен чечилген. Басым үчүн төмөнкү релаксация коэффициенттери  $0,2$ , ылдамдык үчүн -  $0,5$  жана башка чоңдуктар үчүн -  $0,3$ .

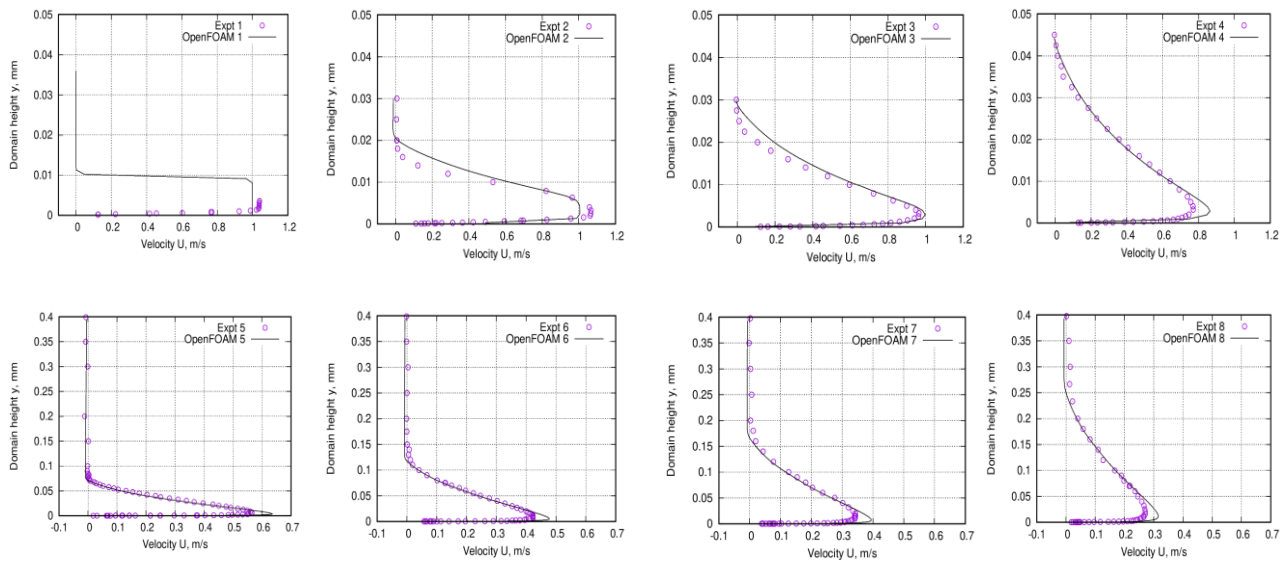
**Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы.** Экспериментте өлчөөлөр төмөнкү агымдагы  $x$  ар кандай маанилерде жүргүзүлгөн. Ылдамдык профилдери ченелген  $8$  секциянын узунунан координаталары метр менен  $x=0,001$ ге барабар болгон;  $0.048$ ;  $0.096$ ;  $0.192$ ;  $0.384$ ;  $0.672$ ;  $0.960$ ;  $1.440$ .

3.3а-сүрөттө Paraview пакетинин жардамы менен алынган ар кандай убакыт ичиндеги  $t$  ылдамдык модулуна талалары көрсөтүлгөн. Эгерде 4с убакытта струя 1,5 м чекитке жетсе, анда 8с убакытта струя  $x = 1,7$  мге жетет.



3.3а-сүрөт. Ылдамдык модулуна талалары

Ар кандай сегиз секциянын  $x/h = 0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 150$  агымы үчүн узунунан ылдамдыктын (3.4-сүрөт) жана туурасынан кеткен ылдамдыктын (3.5-сүрөт) вертикалдык профилдерин тиешелүү эксперименттик маалыматтар менен салыштыруу 3.4-3.5-сүрөттөрүндө көрсөтүлгөн. Бул сүрөттө маркерлер Eriksson, J.G., Karlsson, R.I.(1998) ишинин эксперименталдык маалыматтарына туура келет; сызык - бул иштин сандык натыйжалары.



3.4-сүрөт. Ар кандай секциялардагы узунунан кеткен ылдамдыктын профилдери

3.4-сүрөттө көрүнүп тургандай, узунунан кеткен ылдамдыктын туурасынан кеткен профилдери боюнча эсептелген жана эксперименталдык маалыматтардын ортосундагы дал келүүчүлүк кыйла жакшы деп эсептөө керек.  $x=0,048$  м бөлүккө чейин эсептөөлөрдөгү максималдуу ылдамдык 8%га төмөндөгөн.  $x=0,096$  м бөлүктө дал келүүчүлүк эксперименттин жыйынтыгына шайкеш келет. Андан ары эсептөө төмөндөйт, 9%-13% диапазонундагы узунунан кеткен ылдамдык ашыкча маанини берет.

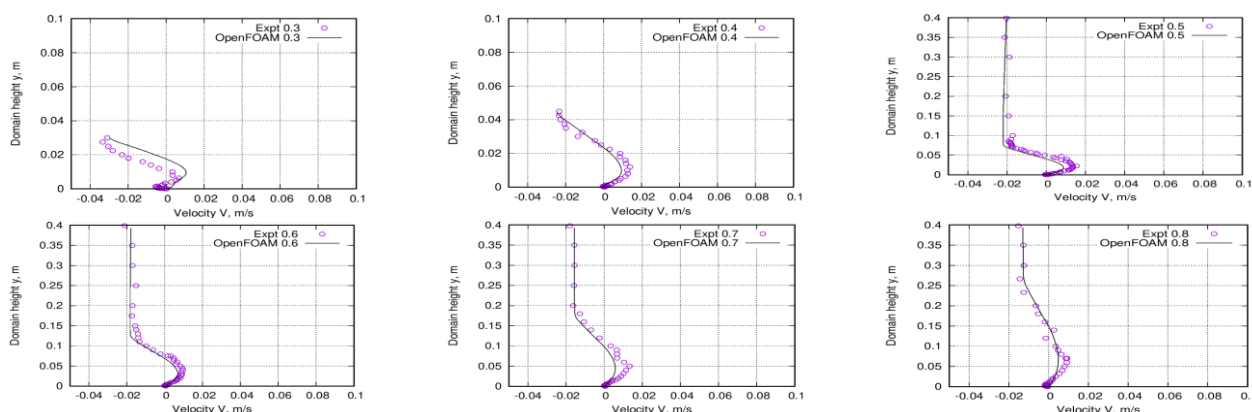


Муну 3.4-таблицадан көрүүгө болот, анда сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары менен сегиз бөлүмдө узунунан кеткен ылдамдыктын туурасынан кеткен профилдери боюнча тиешелүү эксперименталдык маалыматтар ортосундагы айырмачылыктар көрсөтүлгөн.

Таблица 3.4 - Сандык эсептөөлөрдү эксперименталдык маалыматтар менен салыштыруу.

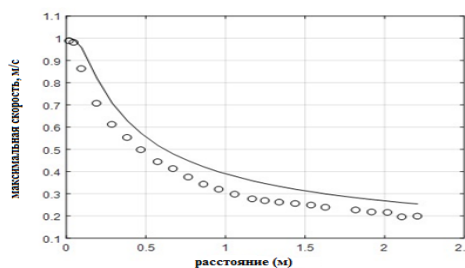
x=0.001м	x=0.048м	x=0.096м	x=0.192м	x=0.384м	x=0.672м	x=0.960м	x=1.440м
4.7%	8%	2%	13%	10%	9%	11%	10%

3.5-сүрөттө алты секциядагы туурасынан кеткен ылдамдык профилдери көрсөтүлгөн. Эсептөө менен эксперименттин ортосундагы салыштыруу канааттандырылгыч.



3.5-сүрөт. Ар кандай бөлүмдөрдөгү туурасынан кеткен ылдамдык профилдери

3.6-сүрөттө агымдын ылдый жагындагы ар кандай участкактордо дубалга жакын агымдын максималдуу ылдамдыгынын өзгөрүү профили көрсөтүлгөн. Дубалга жакын агымдын максималдуу ылдамдыгы боюнча сандык эсептөөлөрдүн натыйжасы менен тиешелүү эксперименталдык маалыматтардын ортосундагы айырмачылык болжол менен 5% ды түзөт.



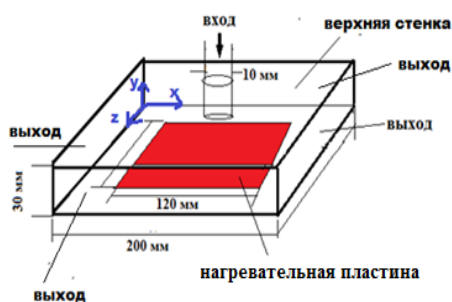
3.6-сүрөт. Дубалга жакын струялык агымдын максималдуу ылдамдыгынын профили.

Ошентип жалпак турбуленттүү агымдын сандык модели узунунан жана туурасынан кеткен ылдамдык компоненттеринин вертикалдык профилдеринде жана максималдуу ылдамдыктын узунунан кеткен профилдеринде сандык жана эксперименталдык маалыматтардын ортосундагы айырмачылык 2%дан 13%га чейин жана тиешелүүлүгүнө жараша 5%. Тактыктын жетишээрлик жогорку даражасында алынган натыйжалар колдонулган математикалык моделдин ишенимдүү экендигин жана оорукананын бөлмөлөрүн желдетүү процессин имитациялоо үчүн колдонулушу мүмкүн экендигин көрсөтүп турат.

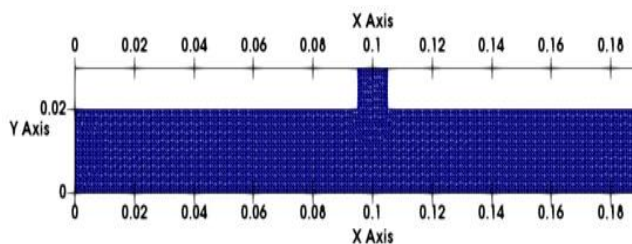
**Маселе № 2. Жылытуу пластинасын сокку агымы менен муздатууну сандык моделдөө.**

Бул стационардык **маселенин максаты** - муздатуу процессине түшкөн турбуленттүү аба агымынын Рейнольдс санынын таасирин изилдөө.

**Маселенин коюлушу.** Моделдештирилген маселенин диаграммасы жана эсептөө аймагынын чектери 3.7а-сүрөттө көрсөтүлгөн жана E. Baydar, Y. Ozmen (2006) эксперименталдык иштеринин геометриясына туура келет. 306К температурадагы аба агымы 39м/с ылдамдыкта диаметри 10мм болгон тегерек түтүк аркылуу 120мм×120мм өлчөмдүү квадраттык жумушчу аянтка агып түшөт, бул Рейнольдс 24000 санына туура келет. Алюминий жылытуу плитасы тегерек түтүктүн чыгуучу четинен 20 мм аралыкта жайгашкан. жылытуу плиталардын өлчөмдөрү 120мм × 120мм болуп саналат. Тегерек түтүктүн симметрия огу жылытуу плитасынын геометриялык борбору аркылуу өтөт. 3.7б.



3.7а-сүрөт-Эсептөө аймагынын геометриясы



3.7б-сүрөт-Эсептөө сеткасы

Бул маселенин максатына жетүү үчүн түшкөн чубурган агым үчүн ылдамдыктын төмөнкүдөй маанилери каралган - 13м/с, 19,5м/с, 26м/с, 39м/с, 52м/с, 58,5м/с, 78м/с. Бул 8000, 12000, 16000, 24000, 32000, 36000, 48000 Рейнольдс сандарына туура келет.

**Маселенин математикалык модели** убакыттын туундуларын эсепке албастан (1-4) теңдемелерге негизделген, анткени маселе стационардуу болгондуктан, турбуленттүү пульсациялардын орточо агымга тийгизген таасирин эске алуу менен buoyantkEpsilon, kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, RNGkEpsilon турбуленттүү моделдери колдонулган.

**Сандык модель.** Эксперименттик шарттарга ылайык, тегерек чубур вертикалдык түтүк аркылуу 39 м/сек ылдамдыкта келип, ысытылган плитадан сокку ургандан кийин домендин 4 каптал бети аркылуу эсептөө аймагынан чыгат.

Эксперименттин алдында кубаттуулугу 3472,22 Вт/м<sup>2</sup> болгон туруктуу бирдей жылуулук агымын пайда кылган жылытуу плитасын муздатуу милдети коюлган. Мындай чектик шартты эске алуу үчүн OpenFOAM пакети аны туруктуу градиент - fixedGradient аркылуу көрсөтүү мүмкүнчүлүгүн берет. Туруктуу градиентти эсептөө үчүн жылуулук агымы менен температура градиентинин ортосундагы байланышты эстеп көрсөк,  $q = \lambda \cdot |\nabla T|$  мында  $\lambda$  алюминийдин жылуулук өткөрүмдүүлүк коэффициентин түзөт. Бул жерден  $\nabla T = q / \lambda = 3472,22 / 0,02699298 = 128634,09 \text{ K/m}$  белгиленген температуранын көрсөткүчтөрү кирүүчү жана чыгуучу жерлерге, ал эми калган үч дубалга

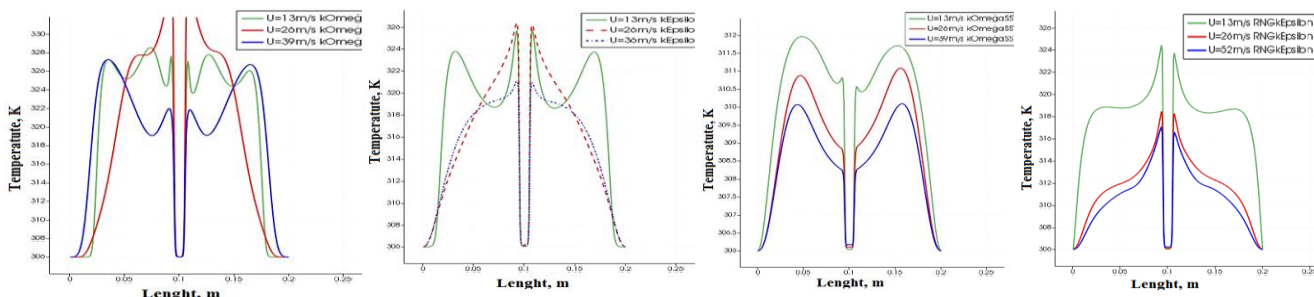
нөлдүк градиент шарты коюлган. Бул физикалык жактан жылуулук өткөрбөйт дегенди билдирет, алар - адиабаттык болгон дубалдардын абалы.

Жөнөкөй процедураны колдонуу менен итерациялардын конвергенциясы басым жана энтальпиянын ката маанилери  $1 \times 10^{-2}$  жана башка чоңдуктар үчүн ката маанилери ( $U, k, \omega, \epsilon$ )  $1 \times 10^{-3}$  төмөн болгондо жетишилет деп болжолдонууда.

**Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы.** Эсептөөчү тордун каныккандыгынын таасирин изилдөө үчүн 5 түрдүү торчо боюнча эсептөөлөр жүргүзүлдү, алардын саны ар кандай контролдук көлөмдө: 368672, 556470, 830320, 1261230 жана 1856720 колдонулган 5 торчолордун, кабыл алынган жана убакыт боюнча сандык чечимдердин тактыгы, эң ылайыктуу. Бул жалпы саны 1 261 230 уячадан турган эсептөөчү тор болуп чыкты жана төмөндө келтирилген сандык натыйжалар ушул эсептөө торуна өзгөчө дал келет.

Температура талаасынын алынган сандык маанилеринин ишенимдүүлүгү эки жол менен текшерилет. Биринчиден, жумушчу аймактын орточо бийиктигинде температуралык профилдердин симметриясынын абалын текшерүү менен маселенин симметриялуу калыптануусунан улам тиешелүү температуралык профилдер  $x = 0,1$  м чекитине карата симметриялуу болуш керек.

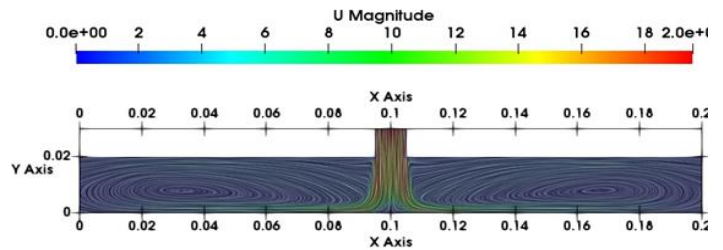
3.8-сүрөттө Ох огуна параллелдүү орточо бийиктиктеги сызык боюнча координаттары (0, 0,015, 0,1) жана (0,2, 0,015, 0,1) менен туташтыруучу чекиттер ар кандай мааниде (13м/с, 26м/с, 39м/с) Рейнольдс саны 8000, 16000, 24000 түшкөн турбуленттик чубурган агымдын температурасынын өзгөрүшү көрсөтүлгөн.



### 3.8-сүрөт. Төрт турбуленттүү моделдер үчүн ылдамдык талаасынын бөлүштүрүлүшү

Минималдуу температурасы  $T = 306$  К чекит чубурдун токтоп калуу зонасы менен дал келерин көрүүгө болот. Чубур жылытуу пластинкасына түшүп,  $x = 0,1$  м чекиттен эки тарапка тең дээрлик симметриялуу четтейт, мында токтоп калуу зонасы пайда болот. Бул 3.9-сүрөттө айкын көрүнүп турат, ал  $z=0,1$  м вертикалдык тегиздикте ылдамдык модулунун изосызыктарын көрсөтөт.

Бул сүрөттө эки карама-каршы багытта айланып,  $x=0,1\text{м}$  чекитке салыштырмалуу симметриялуу эки куюндун пайда болушу көрсөтүлгөн, борборлору ( $x\approx 0,035\text{м}$ ,  $x\approx 0,165\text{м}$ ) эки тараптан болжол менен  $x\approx 0,065\text{м}$  аралыкта жайгашкан.



3.9-сүрөт – Тегиздиктеги ылдамдык модулуунун изосызыктары  $z=0,1\text{м}$

3.2-таблицада температуранын сандык маанилерин жылытуу пластинкасынын бетиндеги 21 чекитте өлчөнгөн эксперименталдык маалыматтар менен салыштыруу ( $y=0$ ) көрсөтүлгөн беш турбуленттик моделдер үчүн -buoyantkEpsilon, kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG Рейнольдс саны  $Re=24000$  үчүн.

3.2-таблица. Температураны салыштыруунун салыштырмалуу каталары

№	Эксперимент	buoyantkEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	kEpsilonRNG
1	384.072	0.78839384	0.78891458	1.30756733	1.736393	3.159824
2	376.619	0.33004177	0.33774186	0.56157549	1.180238	0.187723
3	384.634	0.8077809	0.79088172	1.43071075	1.878149	2.628993
4	377.961	0.77759346	0.77759346	1.24748321	1.55016	1.664457
5	371.736	0.36719607	0.37230723	0.07693632	1.816612	0.372038
6	377.152	1.10194298	1.08842058	1.00834677	1.339513	1.605454
7	366.583	0.25887725	0.25996841	0.64514721	0.436463	0.190407
8	369.575	0.87641209	0.86829466	0.2316174	0.690793	0.625583
9	372.227	0.23990737	0.23480296	0.05587988	0.962316	0.496471
10	363.485	0.46962048	0.47072094	0.75766538	0.040442	0.203585
11	361.08	0.9493741	0.9493741	0.99617813	0.930819	0.759942
12	363.279	0.5257667	0.52439034	0.83186752	0.098547	0.255726
13	372.369	0.19469934	0.195505	0.05397871	0.99874	0.572282
14	370.473	0.62379715	0.6318949	0.05047601	0.929892	0.385723
15	365.941	0.42793784	0.42875764	0.82936867	0.259331	0.023228
16	377.982	0.86644338	0.87993608	1.24212264	1.553778	1.375462
17	372.365	0.19658131	0.19577565	0.07304661	0.995797	0.567454
18	377.741	0.83814042	0.83814042	1.15634787	1.489116	1.571977
19	384.456	0.81855921	0.834946	1.39573839	1.831679	2.681451
20	376.37	0.40252943	0.40093525	0.47479874	1.115657	0.170843
21	384.017	0.83303604	0.83173401	1.27416234	1.717111	2.937891
<b>Орточо каталык</b>		0.604506	0.604811	0.747667	1.121502	1.068405

Бул 3.3-таблицадан көрүнүп тургандай, Н.Цукермандын, Н.Лиордун (2006) айткандарына карама-каршы келген көптөгөн турбуленттүү моделдердин ичинен kOmegaSST турбуленттүү чубур тоскоолдук менен кагылышканда, жылуулук өткөрүмдүүлүк процесстерин эсептөө үчүн артыкчылыктуу турбуленттүүлүк модели болуп саналат. Колдонулган моделдердин ичинен buoyantkEpsilon эң жакшы, ал эми kOmegaSST турбуленттүү модели эң начар болуп чыкты.

Турбуленттик чубур Рейнольдс санынын ар кандай маанилери үчүн системалуу эсептөөлөр (сандык чечимдердин бирдей тактыгы менен) Рейнольдс санынын 8000ден 48000ге чейин көбөйүшү менен эсептөө убактысы

(3.3а таблицасын караңыз) жана итерациялардын саны (3.3 б таблицасын караңыз) бардык 5 турбуленттүү моделдер үчүн азаят.

3.3а-таблица. Ар кандай Рейнольдс сандары үчүн эсептөө убактысы

Моделдер	buoyant kEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	RNGkEpsilon
Рейнольдс саны	Эсептөө убактысы	Эсептөө убактысы	Эсептөө убактысы	Эсептөө убактысы	Эсептөө убактысы
<b>8 000</b>	5704	6054	4945	11405	11088
<b>12 000</b>	4870	4838	4089	4369	4879
<b>16 000</b>	4475	4419	3947	4270	4765
<b>24 000</b>	4257	4242	3418	4224	4751
<b>32 000</b>	4197	4106	3272	4215	4450
<b>36 000</b>	4122	4106	3266	4244	4423
<b>48 000</b>	4117	4122	3265	4414	4633
	<b>27.82%</b>	<b>31.91%</b>	<b>33.97%</b>	<b>61.30%</b>	<b>58.21%</b>

Бул жерде Рейнольдс саны 8000 үчүн kOmegaSST жана RNGkEpsilon моделдерин колдонуу алдын ала аныкталган кичинекей сандан болжол менен бир аз чоңураак итерация катасынын туруктуу маанисине алып келерин белгилей кетүү керек.

3.3б-таблица. Ар кандай Рейнольдс сандары үчүн итерациялардын саны

Моделдер	buoyant kEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	RNGkEpsilon
Рейнольдс саны	Итерациялардын саны	Итерациялардын саны	Итерациялардын саны	Итерациялардын саны	Итерациялардын саны
<b>8 000</b>	1536	1536	1335	3000	3000
<b>12 000</b>	1320	1320	1091	1086	1330
<b>16 000</b>	1198	1198	1057	1051	1286
<b>24 000</b>	1154	1154	919	1037	1306
<b>32 000</b>	1136	1136	875	1043	1200
<b>36 000</b>	1116	1116	868	1047	1197
<b>48 000</b>	1107	1107	845	1061	1187
	<b>27.93%</b>	<b>27.93%</b>	<b>36.70%</b>	<b>64.63%</b>	<b>40.43%</b>

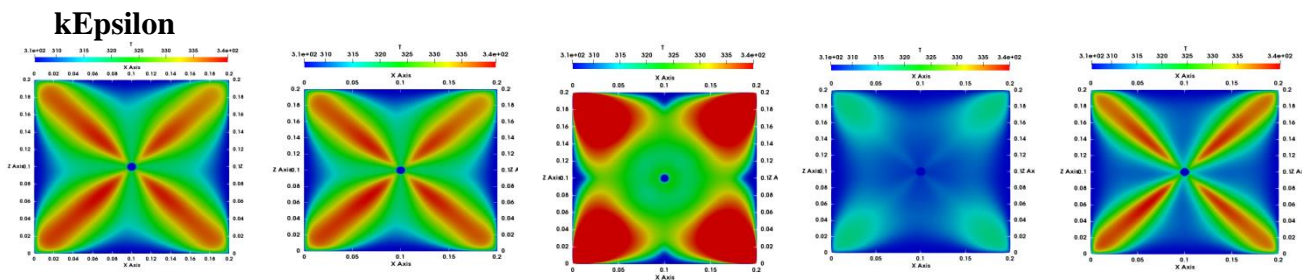
3.3а жана 3.3б таблицадан көрсөтүлгөндөй, Рейнольдс санын 8000ден 48000ге чейин көбөйтүү менен алдын ала аныкталган тактык менен сандык эсептөөлөрдүн эффективдүүлүгү жогорулайт, тактап айтканда, кайталоолордун саны 27,93%га төмөндөп, эсептөө убактысыда төмөндөйт. buoyantkEpsilon турбуленттүүлүк модели үчүн 27,82%, kOmegaSST турбуленттүүлүк модели үчүн бул маанилер тиешелүүлүгүнө жараша 61,30% жана 64,63%ды түзөт.

Ошентип жылытуу агымынын муздатуу процессине ылдамдыктын чектик шартынын таасирин изилдөөнүн бул проблемасында сандык эсептөөлөрдүн эсептөө эффективдүүлүгүнүн байкалган жогорулашы илешкектүү сүрүлүү күчтөрүнүн үстүнөн инерциялык күчтөрдүн үстөмдүк кылуучу ролу жана сүзүүчү агымдын кирүү ылдамдыгынын өсүшү менен байланышкан.

Жүргүзүлгөн системалуу эсептөөлөрдүн негизинде жумушчу аймактын орточо бийиктигинин тегиздигинде абанын температурасынын талаасынын бирдей эмес бөлүштүрүлүшү алынган (3.10-сүрөт).

**buoyant                      kEpsilon                      kOmega                      kOmegaSST                      RNGkEpsilon**





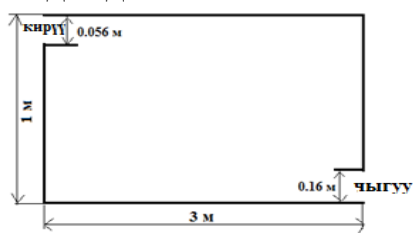
3.10-сүрөт. Тегиздиктеги кирүү ылдамдыгы 39 м/с болгон учурдагы температуралык талаанын бөлүштүрүлүшү

Жылытуу плитасы менен струя ортосундагы жылуулук алмашуу каралган моделдердин ичинен үчөө болжол менен бирдей температура талаасын берет, ал эми  $k\Omega$  SST башка натыйжа берет. Ошентип бул маселени моделдөөнүн натыйжасында, орточо температуранын сандык маанилери менен 21 чекиттеги тиешелүү эксперименталдык маалыматтардын ортосунда жетишээрлик дал келүүчүлүк 1,12%дан ашпаган тактык менен алынды, бул көрсөткүчтүн адекваттуулугун көрсөтөт. Бул маселенин термикалык модели жана аны жугуштуу оорулар бөлүмүнүн желдетүүсүн моделдөө маселесинде колдонуу мүмкүнчүлүгүнө ээ.

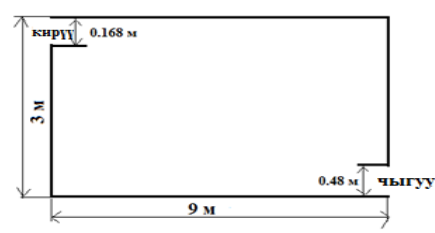
**3-маселе. Кирүүчү агымдын турбуленттүүлүктүн интенсивдүүлүгүнүн бөлмө моделинин желдетүү процессине таасирин моделдөө.**

Бул маселенин максаты  $3\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$  жана  $9\text{м} \times 3\text{м} \times 1\text{м}$  өлчөмүндөгү бөлмөлөрдүн эки геометриялык окшош моделдеринде кириш агымынын турбуленттүүлүгүнүн даражасынын агым талаасына таасирин изилдөө.

**Маселенин коюлушу.** Туруктуу физикалык касиеттери бар газ модели менен сүрөттөлгөн туруксуз изотермиялык аба кыймылын карайбыз: тыгыздыгы  $\rho = 1,204 \text{ кг/м}^3$ , динамикалык коэффициенттери  $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  жана кинематикалык илешкектүүлүк коэффициенти  $\nu = 1.51 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Турбуленттүү аба агымы  $u_0 = 1.3 \text{ м/с}$  (3.11а-сүрөт) жана  $u_0 = 0.455 \text{ м/с}$  (3.11б-сүрөт) ылдамдыгы менен бөлмө моделине кирет.



3.11а-сүрөт.  $3\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$  моделдин геометриясы



3.11б-сүрөт.  $9\text{м} \times 3\text{м} \times 1\text{м}$  моделдин геометриясы

Биринчи моделдин бийиктиги  $H=1\text{м}$ , экинчи моделде  $H=3\text{м}$ , моделдердин узундугу тиешелүүлүгүнө жараша  $3\text{м}$  жана  $9\text{м}$  түзөт. Эсептөө доменинин жогорку сол бурчунда жайгашкан кире бериш тешиктин бийиктиги  $h = 0,056H$  барабар, оң дубалдын төмөнкү бурчуна жакын жайгашкан чыгуунун бийиктиги  $0,16H$  барабар. Эсептөө чөйрөсүнүн геометриялык өлчөмдөрү Restive A.M(1979) эксперименталдык иштерине туура келет. Координаталык системалардын

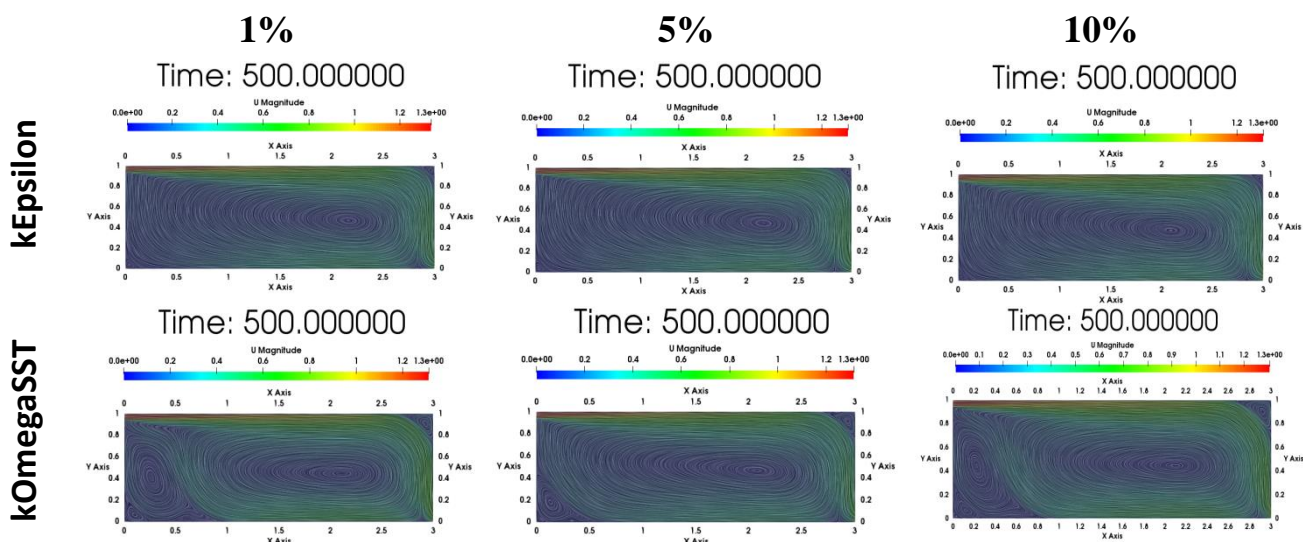
башталышы сол дубалдын төмөнкү сол бурчунда жайгашкан, Ох огу солдон оңго багытталган, ал эми Оу огу вертикалдуу жогору.

**Маселенин математикалык модели** kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG тиешелүү турбуленттүү моделдери менен толукталган (1-2) теңдемелерден турат.

**Сандык модель.** Эсептөө доменинин киришинде кирүү ылдамдыктын эксперименталдык маанилери көрсөтүлөт. Чыгуу чегинде бардык каалаган өзгөрмөлөр үчүн нөлдүк узунунан кеткен градиент көрсөтүлгөн. Эсептөө аймагынын калган чек аралары дубалдар болуп саналат, аларда ылдамдыктын тайгаланбоо шарттары көрсөтүлөт, ал эми турбуленттик мүнөздөмөлөрү дубал функцияларынын аппаратынын жардамы менен эсептелет.

**Эсептөө аймагын жана негизги теңдемелерди дискретизациялоо.** Эсептөө аянты 46875 гексаэдр формасындагы клеткаларга бөлүнгөн. Негизги теңдемелердин дискретизациясы белгилүү PISO процедурасын колдонуу менен контролдук көлөмдөрдүн беттери аркылуу агымдарды эсептөө үчүн тиешелүү дискреттөө схемаларын жана интерполяция ыкмаларын колдонуу менен контролдук көлөм ыкмасын колдонуу менен жүргүзүлдү.

**Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы.** Бөлмө моделиндеги аба агымынын структурасы 3.12-сүрөттө берилген, анда ылдамдык модулунун бир эле убакыт чекиттериндеги ар бир турбуленттүү модели үчүн изолиниясы көрсөтүлгөн. Тор үч учурда тең бирдей, башкача айтканда, агымдагы айырманы эки өлчөмдүү агымды жана турбуленттүүлүктүн интенсивдүүлүгүн 1%, 5% жана 10% болжолдоо үчүн колдонулган турбуленттүү моделдер менен түшүндүрүүгө болот. Көрүнүп тургандай, абанын турбуленттүү чубурган агымы оң дубалга тийип, ылдыйга түшүп кетет, андан кийин струянын бир бөлүгү аймактан чыгып, негизги бөлүгү сол дубалды көздөй жылат. Окшоштуктарды k-ε модели менен k-ε RNG ортосунда байкоого болот.



3.12-сүрөт – Ар түрдүү моделдер үчүн жана ар кандай интенсивдүүлүктөрдөгү ылдамдык модулунун изосызыктары

Төмөнкү сүрөттөрдө эки секциядагы узунунан кеткен ылдамдыктын вертикалдык профилдерин салыштырууну көрсөтүлгөн  $x=1H$  (3.13-сүрөт) жана  $x=2H$  (3.14-сүрөт).

модель  
н

3x1  
1H

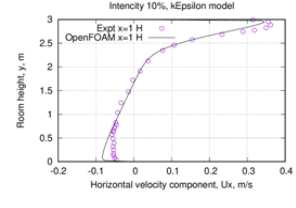
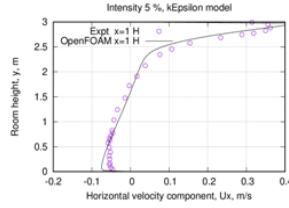
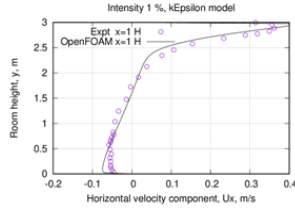
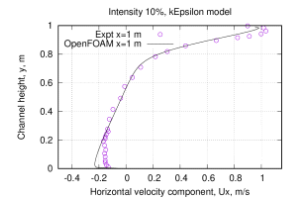
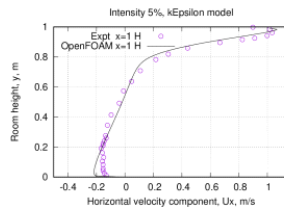
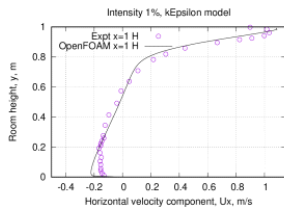
1%

5%

10%

kEpsilon

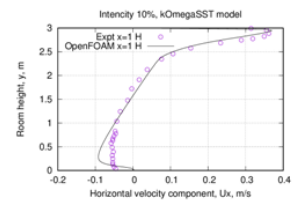
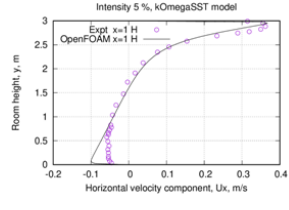
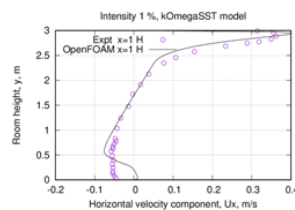
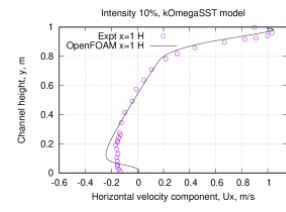
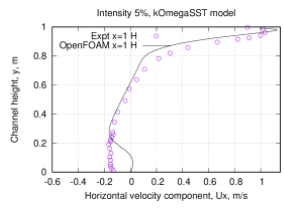
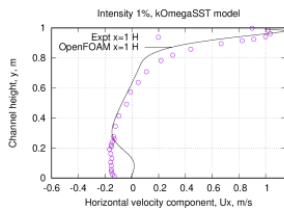
9x3  
1H



3x1  
1H

kOmegaSST

9x3  
1H



3.13-сүрөт.  $x = 1H$  кесиминдеги орточо ылдамдыктын вертикалдык профилдери

1%

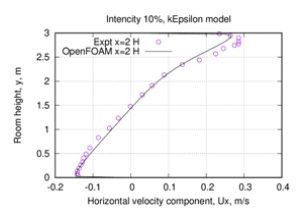
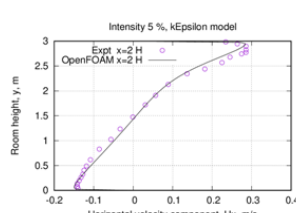
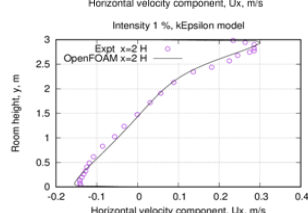
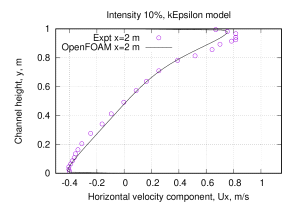
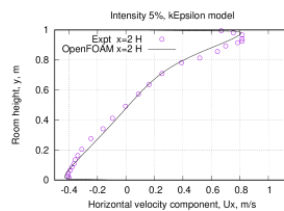
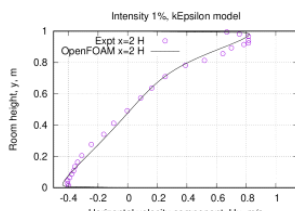
5%

10%

kEpsilon

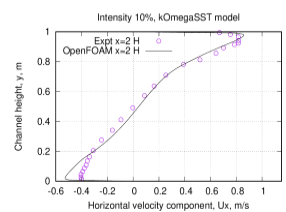
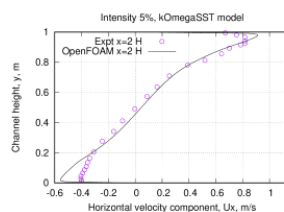
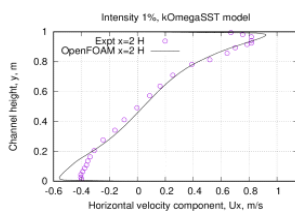
3x1  
2H

9x3  
2H



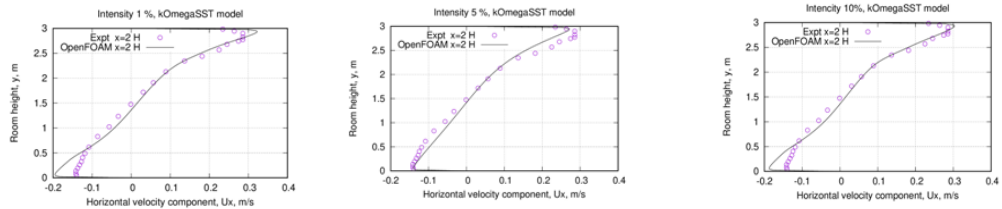
kOmegaSST

3x1  
2H





9×3  
2H



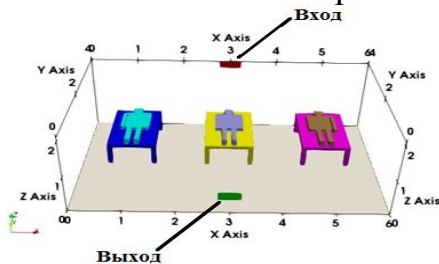
### 3.14-сүрөт. $x = 2H$ кесиминдеги орточо ылдамдыктын вертикалдык профилдери

Бул сүрөттөрдө көрүнүп тургандай, кирүүчү агымдын турбуленттүүлүгүнүн интенсивдүүлүгүнүн агымдын орточо ылдамдыгы талаасына тийгизген таасири эсептөө доменинин катуу дубалдарынын жанында олуттуу жана жалпысынан сандык жана эксперименталдык маалыматтардын ортосундагы дал келүүчүлүк жакшы деп эсептөөгө болот.

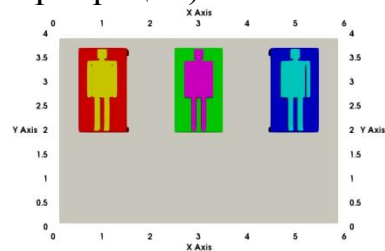
Эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк  $k-\omega$  SST моделин 5% интенсивдүүлүктө колдонууда начарлайт. Биздин эсептөөлөр боюнча, тиешелүү каталар 9,4%га барабар болгон.

### 4-маселе. Жугуштуу оорулар бөлмөсүнүн моделин желдетүү процессин моделдештирүү

Бул маселенин максаты Кара-Суу аймактык ооруканасынын узундугу 6 м, туурасы 4 м жана бийиктиги 2,6 м болгон жугуштуу оорулар бөлүмүндөгү бөлмөдө аба агымынын чыгуучу терс басымынын абанын ылдамдыгы талаасына тийгизген таасирин изилдөө (3.15-сүрөттү караңыз).



3.15-сүрөт. Үч бейтап жайгашкан бөлмөнүн модели



3.15б-сүрөт. Бейтаптарды жайгаштыруу схемасы

Координаталык системалардын келип чыгышы сол дубалдын жакынкы төмөнкү бурчунда жайгашкан. Чыгуу жана кирүүчү тешиктери  $0,5\text{м} \times 0,2\text{м}$  өлчөмдөгү тик бурчтук. Кирүүчү тешиктин геометриялык борбору арткы дубалдын координаттары (3, 4, 2.2) болгон чекитте, ал эми чыгуучу чектин борбору алдыңкы дубалдын координаттары (3, 0, 0,5) болгон чекитте жайгашкан. Температурасы 295,15K болгон атмосфералык абанын агымы эсептик аймакка минималдуу ылдамдык менен кирет жана андан минималдуу ылдамдык менен чыгат.

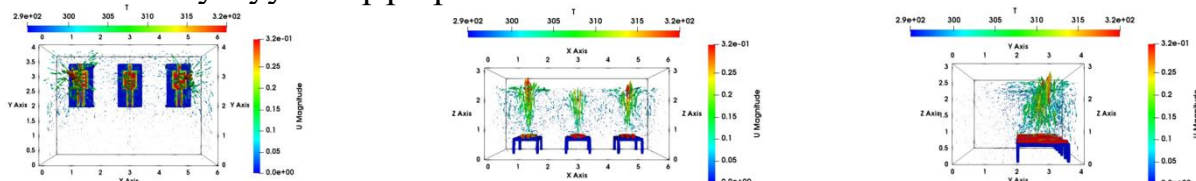
### Маселенин математикалык модели. (1-4) теңдеме.

**Сандык модель.** Эсептөө доменинин дискретизациясы OpenFOAM пакетинин blockMesh жана snappyHexMesh стандарттык утилитасын колдонуу менен алынган. Массанын, импульстун жана энергиянын сакталуу закондорун билдирген негизги теңдемелер системасын дискреттөө контролдук көлөм ыкмасы менен жүргүзүлгөн. Бейтаптын денеси менен бөлмөдөгү курчап турган

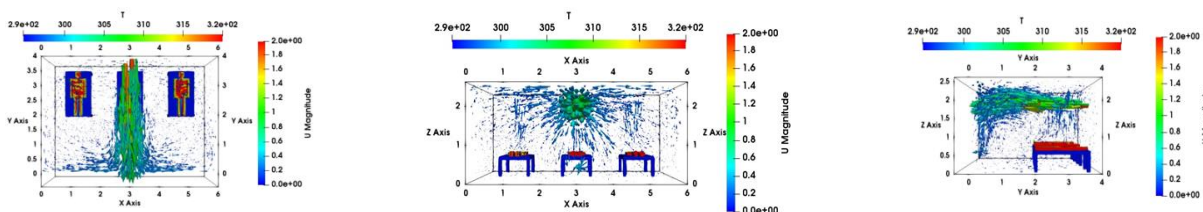
аба агымынын ортосундагы жылуулук алмашуу  $56,52V/m^2$  туруктуу жылуулук агымында OpenFOAM externalWallHeatFluxTemperature пакетинин чектик шарты аркылуу 2-тапшырма сыяктуу ишке ашырылат.

### Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы.

Температурасы 295,15 К болгон атмосфералык абанын агымы кириш аркылуу белгилүү бир ылдамдыкта кирип, терс басым орнотулган чыгыш аркылуу моделден чыгат. 3.16-3.17-сүрөттөр чыгуу басымынын эки маанисинде ылдамдык вектордук талаасын көрсөтөт.  $P_{out}=0$  Падан  $P_{out} = -4$  Пага чейин басым үчүн чектик шартты азайтуу бөлмө моделиндеги бүтүндөй агымдын схемасынын олуттуу өзгөрүшүнө алып келет.



3.16-сүрөт - ХоY (солдо), ХоZ (ортодо) жана YoZ (оң) тегиздигинде  $P_{out} = 0$  Па басымдагы ылдамдык вектордук талаасы

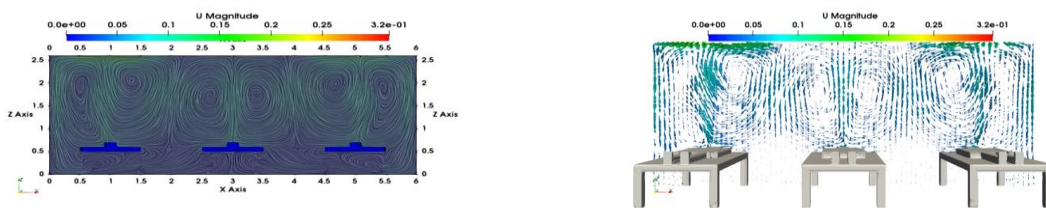


3.17-сүрөт - ХоY (солдо), ХоZ (орттодо) жана YoZ (оң) тегиздигинде  $P_{out} = -4$  Па басымдагы ылдамдык вектордук талаасы

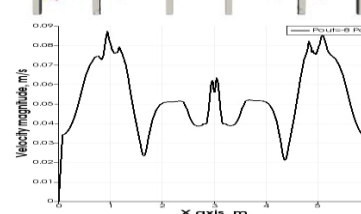
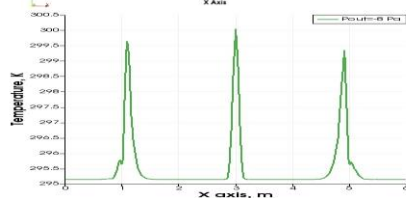
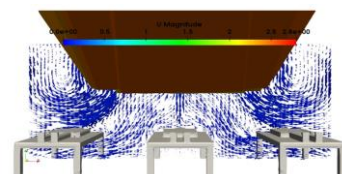
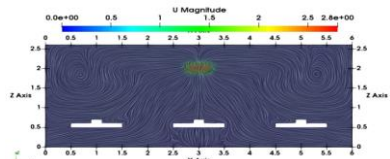
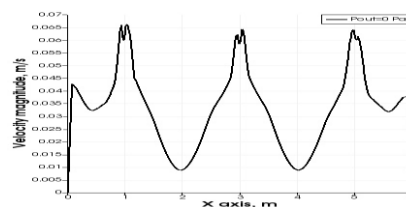
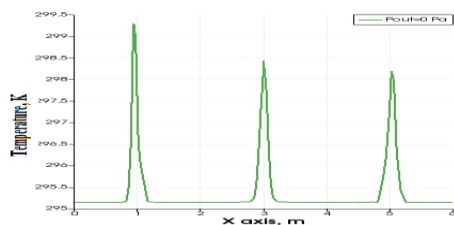
Бүткүл бөлмө боюнча агымдын таралуусунун схемасын көрүүгө болот - максималдуу ылдамдыгы 0,32 м/с дан 1,8 м/с чейин эркин конвекция учурунан. Бул учурда конвекция процесси күчөйт, эркин конвекция аргасыз конвекцияга айланат, ал 3.18-сүрөттөн ачык көрүнүп турат. Анда ылдамдык модулуунун изолиниялары, ылдамдык вектордук талаасы жана бөлмөнүн орточо бийиктигиндеги температура менен ылдамдыктын горизонталдык профилдери көрсөтүлгөн.

3.17-сүрөттөн көрүнүп тургандай, температуранын жана орточо ылдамдык модулуунун симметриялуу узунунан кеткен профили (Ox огу боюнча) максималдуу ката чегинде тиешелүүлүгүнө жараша 2,69% жана 5,67% алынды.  $P_{out} = 0$  Па Рэйли-Бенард конвективдик клеткаларынын пайда болушун көрүүгө болот.

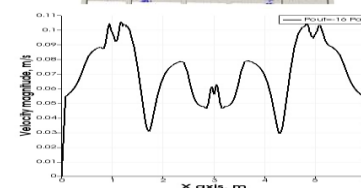
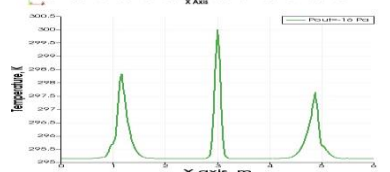
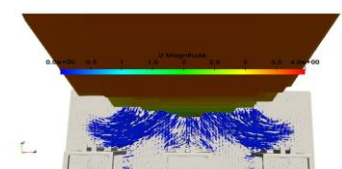
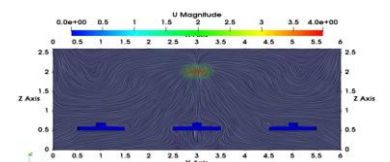
**$P_{out} = 0$  Па**



**$P_{out} = -8$  Па**



**$P_{out} = -16$  Па**



### 3.18-сүрөт. Изосызыктар жана ылдамдык талаасы, температура жана ылдамдык профилдери

Бул графиктерди салыштыруу эркин конвекция  $P=0$ Па учуруна салыштырмалуу сол жана оң жактагы бейтаптардын жанындагы агым температурасынын максимумдарынын ортодогу бейтапка карай жылышын көрсөтөт. Мындан тышкары, жылышуу чоңдугу терс чыгуу басымынын жогорулашы менен көбөйөт.

Жугуштуу оорулар бөлүмүнүн моделинде аба агымынын гидродинамикалык мүнөздөмөсүнө басымдын терс чыгуу чектик шартынын таасирине изилдөө жүргүзүлгөн.  $P_{out}=0$  Падан  $P_{out} = -16$  Пага чейин басымдын чектик шартын төмөндөтүү палата моделиндеги бүтүндөй агымдын схемасынын олуттуу өзгөрүшүнө алып келери аныкталган. Үч бейтаптын тандалып алынган жайгашуусу менен бөлмө үчүн сунушталган желдетүү схемасы талап кылынган жайлуу ылдамдыкты камсыз кылат. Бөлмөдөгү конвекция агымы эргономикасынын эл аралык стандартына ылайык  $0,2$  м/с ылдамдыктан ашпайт.

### Корутунду

Диссертациялык иштин негизги натыйжалары жана корутундулары болуп төмөнкүлөр саналат:

- Жылытуу пластинасын муздатуу процессин моделдештирүүдө сокку уруучу агымдын Рейнольдс саны 8000ден 48000ге чейин көбөйөт, алдын ала

аныкталган тактыктагы сандык эсептөөлөрдүн эсептөө эффективдүүлүгү жогорулайт, тактап айтканда, кайталоолордун саны 27,93%га азаят жана эсептөө убактысы buoyantkEpsilon турбуленттүүлүгү модели үчүн 27,82% га төмөндөйт.

- $3 \times 1 \times 1$  жана  $9 \times 3 \times 1$  өлчөмдүү бөлмөнүн моделдердеги агымдардын геометриялык жактан окшош эки вертикалдык кесилишинде окшоштугу алынды. k- $\omega$  SST модели үчүн эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк 5% интенсивдүүлүктө эң начар экендиги көрсөтүлгөн.

- Алгачкы жолу Кара-Суу аймактык ооруканасында жугуштуу оорулар бөлмөсүн желдетүүнү уюштурууда терс басымдагы чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Орточо ылдамдык профили -8Па жана -16Па терс чыгуу басымында нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтаптан турган жугуштуу оорулар палата үчүн сунушталган желдетүү схемасы талап кылынган ыңгайлуулукту камсыздай тургандыгы көрсөтүлгөн - ылдамдыгы 0,2 м/с ашпайт.

## **ДИССЕРТАЦИЯНЫН ТЕМАСЫ БОЮНЧА БАСЫЛЫП ЧЫККАН ЭМГЕКТЕРДИН ТИЗМЕСИ:**

1. **Абдимуталипова З.К.** Имплементация пристеночных функций в пакете OpenFOAM. [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К., Полот кызы Гулмира. // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2018, стр. 103-106. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32795571>

2. **Абдимуталипова З.К.** Моделирование осесимметричного струйного течения [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы., Калбекова М.Ж., Сулайманова Г.К. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. 2018г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2018г. Ст:68-72. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37014603>

3. **Абдимуталипова З.К.** Моделирование методом крупных вихрей воздушно струйного теплообмена при умеренных числах Рейнольдса [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. 2019г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2019г. Ст:3-9. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41540162>

4. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование нестационарного ламинарного обтекания кругового цилиндра. [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К., Марс кызы Гаттыбүбү., Калмурзаева А.Т. // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2021, стр. 166-175. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46561758>



5. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование падающей из круглого сопла струи с использованием OpenFOAM [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XVII Международный Азиатской школы-семинар.2021г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий СО РАН 2021г. Ст:5-9. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-padayuschey-iz-kruglogo-sopla-strui-s-ispolzovaniem-openfoam>

6. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование сверхзвуковых струйных течений с использованием RANS и LES моделей [Текст] // Горный журнал, КГУ геологии, Бишкек, Кыргызстан, №2, 2021, стр. 9-12. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47387097>

7. **Абдимуталипова З.К.** О численном моделировании ударного струйного теплообмена [Текст] // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2021, стр. 142-150. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46580155>

8. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование турбулентных струйных течений [Текст] // Вестник КГСТУА им. Н. Исанова. – 2022.–№ 1 (75). – с.197-201.–То же:[Электронный ресурс].–Режим доступа: <https://vestnikksucta.kg/2022-2/>

9. **Abdimutalipova Z.K.** Numerical simulation of a flat turbulent near-wall jet in the OpenFOAMv7 package [Текст] Scopus: IOP Publishing Conference Series Journal of Physics: Conference APITECH III 2022. – То же: [Электронный ресурс]. –Режим доступа:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/2/022019>

10. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование взаимодействия турбулентной падающей струи с вращающимся диском [Текст] // Наука и образование: проблемы и перспективы.– Бийск, –2022. № 1– стр.24-29. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www2.bigpi.biysk.ru/nir2016/file/kedbzit\\_15\\_09\\_2022\\_08\\_51\\_06.pdf](http://www2.bigpi.biysk.ru/nir2016/file/kedbzit_15_09_2022_08_51_06.pdf)

11. **Абдимуталипова З.К.** Программа для численного моделирования распространения пассивного скаляра в горизонтальном струйном течении [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К. // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №737, 15.03.2022. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>

12. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование плоской турбулентной пристенной струи в пакете OpenFOAMv7 [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №738, 15.03.2022. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>

13. **Abdimutalipova Z.K.** Numerical simulation of turbulent airflow in a room using the OpenFOAM package[Текст]Web of science//Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.Issue VI, –2023. pp. 145-150. <https://doi.org/10.31643/2023.17>

## РЕЗЮМЕ

диссертационной работы Абдимуталиповой Зейнура Каныбековны на тему: «Численное моделирование струйных турбулентных течений» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Ключевые слова:** турбулентный поток, теплопроводность, охлаждения, падающая струя, пристеночная струя, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Объект исследования:** турбулентное струйное течения.

**Предметом исследования** является численное исследование влияния эффекта вынужденной конвекции в больничной палате.

**Целью исследования** является развитие метода моделирования струйных турбулентных течений в рамках прикладного пакета OpenFOAM на примере вентиляции палат Карасуйской территориальной больницы.

**Методы исследования и аппаратура.** Численное интегрирование стационарных и нестационарных, осредненных по Рейнольдсу трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих струйных турбулентных течений.

**Научная новизна полученных результатов работы.**

- Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с ростом числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчетов с наперед заданной точностью, а именно число итераций уменьшается на 27.93 % и время расчета уменьшается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

- Получено подобие течений в моделях палат с размерами  $3 \times 1 \times 1$  и  $9 \times 3 \times 1$  в двух геометрически подобных вертикальных сечениях. Показано, соответствие между экспериментом и численным расчетом для модели  $k-\omega$  SST является наихудшей при интенсивности 5%.

- Впервые было проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления при организации вентиляции инфекционной палаты с отрицательным давлением Карасуйской территориальной больницы. Обнаружено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при -8Па и -16Па отрицательных значениях выходного давления по сравнению с нулевым выходным давлением.

- Показано, что при предложенной схеме вентиляции инфекционной палаты из трех пациентов обеспечивается нужный скоростной комфорт - скорость не превышает значения 0.2м/с.

**Степень использования или рекомендации по использованию.** Результаты исследования могут быть использованы для вентиляции модели инфекционных палат с учетом теплообмена.

**Область применения.** Результаты исследования могут быть рекомендованы к внедрению в организации деятельности инфекционного отделения Карасууской территориальной больницы с целью организации вентиляции инфекционной палаты с отрицательным давлением.

**Абдимуталипова Зейнура Каныбековнанын 01.02.05- суюктуктун,  
газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика  
илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алуу үчүн «Чубурган  
турбуленттик агымдарды сандык моделдештирүү» темасында  
диссертациясынын  
РЕЗЮМЕСИ**

**Ачкыч сөздөр:** турбуленттүү агым, жылуулук өткөрүмдүүлүк, муздатуу, түшүү агымы, дубал агымы, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Изилдөөнүн объектиси:** турбуленттүү чубурган агым.

**Изилдөөнүн предмети** болуп оорукананын палатасында аргасыз конвекциянын таасиринин сандык изилдөөсү саналат.

**Изилдөөнүн максаты** Кара-Суу аймактык ооруканасынын палаталарын желдетүү мисалында OpenFOAM тиркеме пакетинин алкагында турбуленттүү чубурган агымдарды моделдөө ыкмасын иштеп чыгуу болуп саналат.

**Изилдөө ыкмалары жана жабдуулар.** Турбуленттүү чубурган агымдарды сүрөттөгөн стационардык жана стационардык эмес, Рейнольдс боюнча орточо алынган үч өлчөмдүү Навье-Стокс теңдемелеринин сандык интеграциясы.

**Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы.**

- Жылытуу пластинасын муздатуу процессин моделдештирүүдө сокку уруучу агымдын Рейнольдс саны 8000ден 48000ге чейин көбөйөт, алдын ала аныкталган тактыктагы сандык эсептөөлөрдүн эсептөө эффективдүүлүгү жогорулайт, тактап айтканда, кайталоолордун саны 27,93%га азаят жана эсептөө убактысы buoyantkEpsilon турбуленттүүлүгү модели үчүн 27,82% га төмөндөйт.

- $3 \times 1 \times 1$  жана  $9 \times 3 \times 1$  өлчөмдүү бөлмөнүн моделдердеги агымдардын геометриялык жактан окшош эки вертикалдык кесилишинде окшоштугу алынды. k- $\omega$  SST модели үчүн эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк 5% интенсивдүүлүктө эң начар экендиги көрсөтүлгөн.

- Кара-Суу аймактык ооруканасында терс басымдагы инфекциялык бөлүмдү вентиляциялоону уюштурууда биринчи жолу басымга чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Орточо ылдамдык профили -8Па жана -16Па терс чыгуу басымында нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтаптан турган инфекциялык палата үчүн сунушталган желдетүү схемасы талап кылынган ыңгайлуулукту камсыздай тургандыгы көрсөтүлгөн - ылдамдыгы 0,2 м/с ашпайт.

**Колдонуу көлөмү же колдонуу боюнча сунуштар.** Изилдөөнүн натыйжалары жылуулук алмашууну эске алуу менен инфекциялык бөлмөнүн моделин желдетүү үчүн колдонулушу мүмкүн.

**Колдонуу чөйрөсү.** Изилдөөнүн натыйжалары Кара-Суу аймактык ооруканасынын инфекциялык бөлмөсүн терс басым менен желдетүүнү уюштурууну ишке киргизүү үчүн сунушталышы мүмкүн.

## SUMMARY

**dissertation work of Zeinura Kanybekovna Abdimutalipova  
on the topic: “Numerical modeling of jet turbulent flows” for the degree of  
candidate of physical and mathematical sciences in specialty 01.02.05 –  
“Mechanics of liquid, gas and plasma”**

**Keywords:** turbulent flow, thermal conductivity, cooling, incident jet, wall jet, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

**Object of study:** turbulent jet flow.

**The subject of the study** is a numerical study of the influence of the effect of forced convection in a hospital ward.

**The purpose of the study** is to develop a method for modeling turbulent jet flows within the framework of the OpenFOAM application package using the example of ventilation of wards of the Karasu territorial hospital.

**Research methods and equipment.** Numerical integration of stationary and nonstationary, Reynolds-averaged three-dimensional Navier-Stokes equations describing turbulent jet flows.

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

- It is shown that when modeling the cooling process of the heating plate with an increase in the Reynolds number of the impact jet from 8,000 to 48,000, the computational efficiency of numerical calculations with a predetermined accuracy increases, namely, the number of iterations decreases by 27.93% and the calculation time decreases by 27.82% for the buoyantkEpsilon turbulence model.
- The similarity of flows in chamber models with dimensions  $3 \times 1 \times 1$  and  $9 \times 3 \times 1$  in two geometrically similar vertical sections was obtained. It is shown that the agreement between experiment and numerical calculation for the  $k-\omega$  SST model is worst at an intensity of 5%.
- For the first time, numerical modeling of the influence of the output boundary condition for pressure was carried out when organizing ventilation of the infectious disease ward with negative pressure at the Karasu Territorial Hospital. The average velocity profile was found to increase by 6% and 24% at -8Pa and -16Pa negative outlet pressures compared to zero outlet pressure.
- It is shown that the proposed ventilation scheme for an infectious diseases ward of three patients provides the required speed comfort - the speed does not exceed 0.2 m/s.

**Extent of use or recommendations for use.** The results of the study can be used for ventilation of a model of infectious disease wards taking into account heat exchange.

**Application area.** The results of the study can be recommended for implementation in the organization of activities of the infectious diseases department of the Karasuu Territorial Hospital in order to organize ventilation of the infectious diseases ward with negative pressure.