

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

Д 01.25.711 Диссертациялык кеңеши

Кол жазма укугунда
УДК:532.542.4

Абдимуталипова Зейнура Каныбековна

Струялык 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-2025

Диссертациялык иш Ош мамлекеттик университетинин
Эксперименталдык жана теориялык физика кафедрасында аткарылды

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

Расмий оппоненттери: **Бекетаева Асель Орозалиевна**, физика-математика илимдеринин доктору, Аль-Фараби атындагы Казак улуттук университетинин математикалык жана компьютердик моделдөө кафедрасынын доценти.

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

Жетектөөчү мекеме: «К.И.Сатпаев атындагы Казак улуттук илимий-техникалык университети» АК, Казакстан Республикасы, Алматы, 050043, көч. Сатпаева, 22.

Диссертацияны коргоо 2025-жылдын 15-майында саат 14:30да Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинде илимдин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн диссертацияларды коргоо боюнча Д 01.25.711 диссертациялык кеңешинин отурумунда болот. И.Раззакова жана Кыргыз- Орус Славян университети. Б.Ельцин дареги боюнча: 720044, Кыргыз Республикасы, Бишкек шаары, Ч.Айтматов пр., 66, КМТУ. И.Раззакова, (КАЗ, кабинет 1/257).

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

Диссертация менен Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин китепканаларынан таанышууга болот. И.Раззаков 720044, Кыргыз Республикасы, Бишкек шаары, Ч.Айтматов пр., 66 жана КРСУ дареги боюнча. Б. Ельцин дареги боюнча: 720000, Кыргыз Республикасы, Бишкек ш., көч. Киев 44 жана www.vak.kg

Автореферат тийиштүү тараптарга 2025-жылдын 9-апрелинде таратылып берилген.

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



Доталиева Ж.Ж.

ИЗИЛДӨӨНҮН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ

Диссертациянын темасынын актуалдуулугу. Азыркы учурда эн актуалдуу болгон маселе — бул оорукана палаталарында механикалык желдетүү шартында аба алмашуу жана абанын бөлүштүрүлүшүн струя агымдарынын мыйзам ченемдүүлүктөрүнө жана жылуулук-массалык алмашуу процесстеринин жакындатылган математикалык моделдерине негизделген комплекстүү түрдө чечүү принциби болуп саналат. Желдетилген бөлмөдөгү ылдамдык жана температуралык талаалардын түзүлүү мыйзам ченемдүүлүктөрүн аныктоо үчүн үч өлчөмдүү Навье–Стокс теңдемелерине негизделген эсептик гидродинамиканын ыкмалары күчтүү колдонмо программалык пакеттер менен бирдикте кеңири колдонулат.

Турбуленттик струялык агымдын теориясынын негиздери Г.Н. Абрамовичтин (2011), И.А. Беловдун (2001), А.С. Гиневскийдин (1969), Д.Купердин (1993), П.Г. Фриктин (2003), А.А. Юн (2010) эмгектеринде берилген.

Инфекциялык бөлмөлөрдө желдетүүнү жана абанын кыймылын оптималдаштыруу маселелери алыскы чет өлкөлүк окумуштуулардын эмгектеринде каралган: S. L. Miller (2021), T. L. Le (2022), Suhendi (2024), Вшивкова А. П. (2024), Hyung-Eun Park (2024), A. Lavrinenko (2025), Sudniks, R. (2025).

Бул иште жылуулук алмашуусун эске алуу менен оорукана палатасындагы абанын кыймылына басым үчүн коюлган чыгуудагы терс чек ара шартынын таасири изилденген. Жогоруда айтылгандар диссертациянын актуалдуулугун тастыктайт.

Диссертациянын темасынын илимий программалар менен же илимий изилдөө иштери менен байланышы. Жумуш ОшМУнун Математика, физика, техника жана маалыматтык технологиялар Институтунун эксперименталдык жана теоретикалык кафедрасында илимий-изилдөө иштеринин тематикасы боюнча иштелип чыккан.

Изилдөөнүн максаты – OpenFOAM тиркеме пакетинин алкагында бөлмөдөгү аба кыймылын мисалында струялык турбуленттүү агымдарды моделдөө ыкмасын өркүндөтүү.

Коюлган максатка жетүү үчүн төмөнкү маселелер чечилди:

- Турбуленттүү чубурган агымдарды сандык моделдөөнүн колдонуудагы ыкмаларына аналитикалык анализ жүргүзүү жана аларды андан ары өркүндөтүүнүн мүмкүн болгон жолдорун аныктоо.
- Дубалга жакын турбуленттик агымды сандык моделдөө аркылуу колдонулган математикалык моделдин адекваттуулугун текшерүү.
- Жылытуу пластинкасын муздатуудагы турбуленттүү урунуунун Рейнольдс санынын таасирин моделдөө.
- Кирүүчү струянын турбуленттүүлүк интенсивдүүлүгүнүн бөлмөдөгү абанын кыймылына таасирин моделдөө.
- Жылуулук алмашуусун эске алуу менен инфекциялык палатанын моделинде абанын кыймылына басым үчүн терс чыгуу чек ара шартынын таасирин моделдөө.

Иштин алынган натыйжаларынын илимий жаңылыгы.

1. $3 \times 1 \times 1$ жана $9 \times 3 \times 1$ өлчөмдөрүндөгү палаталардын моделдеринде геометриялык жактан окшош болгон эки вертикалдык кесилиштеги агымдардын окшоштугу алынган. Эксперименттик маалыматтар менен $k-\omega$ SST моделиндеги сандык эсептөөлөрдүн дал келиши интенсивдүүлүк 5% болгон учурда эң начар экени көрсөтүлдү.

2. Инфекциялык палатанын моделинде терс басым шартында абанын кыймылын уюштурууга чыгуу чек ара шартынын таасири сандык моделдөө жолу менен изилденди. Чыгуу басымынын мааниси -8 Па жана -16 Па болгондо, нөлдүк басымга салыштырмалуу орточо ылдамдыктын профили тиешелүүлүгүнө жараша 6% жана 24% га жогорулай турганы аныкталды.

3. Инфекциялык палатаны желдетүүнүн сунушталган схемасы, кыймылсыз бейтаптардын жайгашуусу менен, абанын ылдамдыгы 0.2 м/с ашпай турган керектүү ылдамдык ыңгайлуулугун камсыз кылышын көрсөтүлгөн.

Алынган натыйжалардын практикалык мааниси.

Берилген диссертациялык ишти аткарууда алынган натыйжалар турбуленттүү струялык агымдарды математикалык моделдөө ыкмасына белгилүү өлчөмдө салым кошушат. Изилдөөнүн жыйынтыгы Кара-Суу аймактык «Курманжан Датка» ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлүмүнүн ишмердүүлүгүнө жалпы палатадагы булгануучу заттарды чыгаруу жана желдетүү боюнча киргизилди.

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

Диссертациянын коргоого коюлуучу негизги жоболору:

- Тегиз беттеги агымдын моделдөөнүн жана жылытуу плитасын муздатуунун натыйжалары.
- оорукананын жугуштуу оорулар бөлүмүндө струялык агымды моделдөөнүн натыйжалары.

Илимий жоболордун, натыйжалардын (тыянактардын) жана рекомендациялардын 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.

Изденүүчүнүн жеке салымы. Диссертация автордун жеке изилдөөлөрүнүн жыйынтыгы болуп саналат. Автордун жеке салымы максатка жетүү ыкмаларын тандоодо, изилдөөлөрдү жүргүзүүдө, алынган жыйынтыктарды талдоодо жана жыйынтыктарды формулировкалоодо, ошондой эле макалаларды жарыялоодо болуп саналат.

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

- 8th Computational Methods in Systems and Software 2024, CoMeSySo 2024. Vsetin, Czech Republic, October 25-28, 2024.

- Профессор Багдаулет Кенжалиевдин 75 жылдыгына арналган “Илимдин чакырыктары” эл аралык практикалык конференциясы, Алматы, Казакстан, 15-16-ноябрь, 2023-ж.

- XXIV Эл аралык илимий-практикалык конференция «Илим жана билим берүү: көйгөйлөр жана келечек», Россия, Алтай аймагы, 2022-жыл 15-апрели.

- II Эл аралык конференция ICMSIT-III 2022: Инновациялык технологиялардын метрологиялык камсыздалышы. 2022-жылдын 3-5-марты, Красноярск - Санкт-Петербург, Россия.

- IV Эл аралык илимий-практикалык конференция «Илим-техникалык жана билим берүү чөйрөсүндөгү маалыматтык технологиялар», КГУСТАнын жаңы маалыматтык технологиялар институтунун 20 жылдыгына арналган, 2021-жылдын 29-октябры, Бишкек, Кыргызстан.

- Эл аралык илимий конференция «Илимде жана тоо-кен техникалык билим берүүнүн маалыматтык технологиялары жана математикалык моделдөө», Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги, физика-математика илимдеринин доктору Жайнаков Аманбекке 80 жылдыгына арналган, Кыргызстан, Бишкек, 2021-жылдын 6-8-октябры.

- XIV, XV жана XVII Эл аралык Азия мектеби-семинары «Татаал системалардын оптимизациясынын көйгөйлөрү», Казакстан, Алматы, 2018-жылдын 30-31-июлу; Новосибирск, Россия, 2019-жыл, 2021-жыл.

Диссертациянын жыйынтыктарынын басылмаларда чагылдырылышынын толуктугу. Изилдөөнүн негизги жыйынтыктары 11 илимий макалада жана 2 автордук күбөлүктө, анын ичинде Скопус (1), РИНЦ (3), IF -0.173(1) маалымат базасына кирген Кыргыз Республикасынан тышкары илимий журналдарда басылып чыккан.

Диссертациянын структурасы жана көлөмү. Диссертация киришүү, 3 бөлүм, жыйынтык, практикалык сунуштар, библиография жана тиркеме бөлүмдөрүнөн турат. Жумуш 135 бет текстти, 38 сүрөттү, 17 таблицаны, 72 библиографиялык шилтемени жана 5 тиркемени камтыйт.

ДИССЕРТАЦИЯНЫН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ

Киришүүдө теманын актуалдуулугу негизделип, изилденип жаткан маселенин коюлушу, изилдөөнүн максаттары жана милдеттери формулировкаланып, эмгектин илимий жаңылыгы жана практикалык мааниси көрсөтүлдү. Кысылбоочу суюктуктун агымдарын, алардын артыкчылыктарын жана кемчиликтерин моделдөөдө азыркы мамилелер талкууланат. Диссертациянын түзүлүшү жана негизги мазмуну, бөлүмдөр боюнча кыскача баяндалды.

Биринчи бап – Адабияттарга сереп. Аба агымдарынын кыймылын моделдөөнүн заманбап ыкмалары боюнча адабияттарга сереп жүргүзүлдү. Бул

ыкмалар аргасыз конвекцияны жана жылуулук алмашууну эске алуу менен турбуленттүү агымдарга негизделген.

Экинчи бап – «Изилдөөнүн методологиясы жана ыкмалары» OpenFOAM пакетинин негизинде контролдук көлөмдөр ыкмасын колдонуу менен жалпыланган өзгөрмө үчүн жалпыланган теңдемени дискретизациялоо ыкмалары каралды.

Турбуленттүү чубурган агым **изилдөөнүн объектиси** болуп саналат.

Изилдөөнүн предмети - инфекциялык палата моделинде терс чек ара шарттарынын аба кыймылына тийгизген таасирин сандык моделдештирүү.

Каралып жаткан маселени математикалык модели Рейнольдс боюнча орточолонгон Навье-Стокс теңдемелер системасына негизделген, ал үзгүлтүксүздүк, импульсту ташуу жана энтальпия теңдемелерин камтыйт:

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

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

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

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = P_k - \rho \varepsilon + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

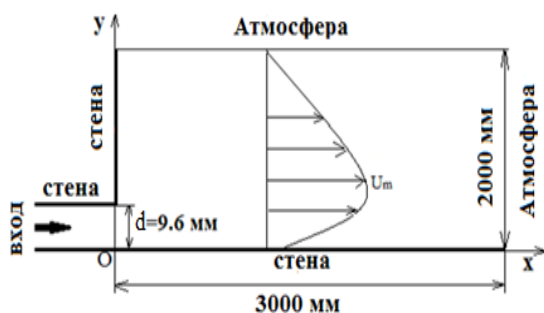
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tau) + \nabla(\mathbf{u} \tau) - \nabla \cdot \left(\frac{\rho \mu_{eff}}{\sigma_{eff}} \nabla \tau \right) = 1 \quad (7)$$

Ылдамдык, температура, басым жана башка чоңдуктар үчүн кирүүчү чек ара шарттары эксперименттик маалыматтарга негизделип аныкталат. Агымдын турбуленттик мүнөздөмөлөрү үчүн чек ара шарттары дубалга жакын функциялар аппараты аркылуу берилет, ал эми дискретизациядан кийин алынган сызыктуу алгебралык теңдемелер системасы PIMPLE(SIMPLE) алгоритминин жардамы менен чечилет (Launder and Spalding, 1974).

Үчүнчү бап- Струялык турбуленттик агымдарды сандык моделдештирүү. Бул бөлүмдө өзүбүздүн изилдөөбүздүн натыйжалары берилген.

1-Маселе. Жалпак турбуленттүү дубалдын агымынын сандык моделдөөсү. Бул маселенин максаты турбуленттүү дубал агымынын ылдамдык талааларын сандык жактан изилдөө болуп саналат.

Маселенин коюлушу. Бул иште жанаша жалпак турбуленттүү агым үчүн математикалык моделдештирүү жүргүзүлгөн. Алынган сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары эксперименттик маалыматтар менен салыштырылган. Бул маалыматтар классикалык ERCOFTAC турбуленттик агымдар базасынан алынган жана төмөнкү изилдөөчүлөрдүн эмгектеринен алынган: Eriksson, J.G., Karlsson, R.I., Persson, J. (1998). Масштабын сактабастан, моделдештирилген маселенин схемасы жана эсептөө аймагынын чектери 3.1-сүрөттө көрсөтүлгөн.

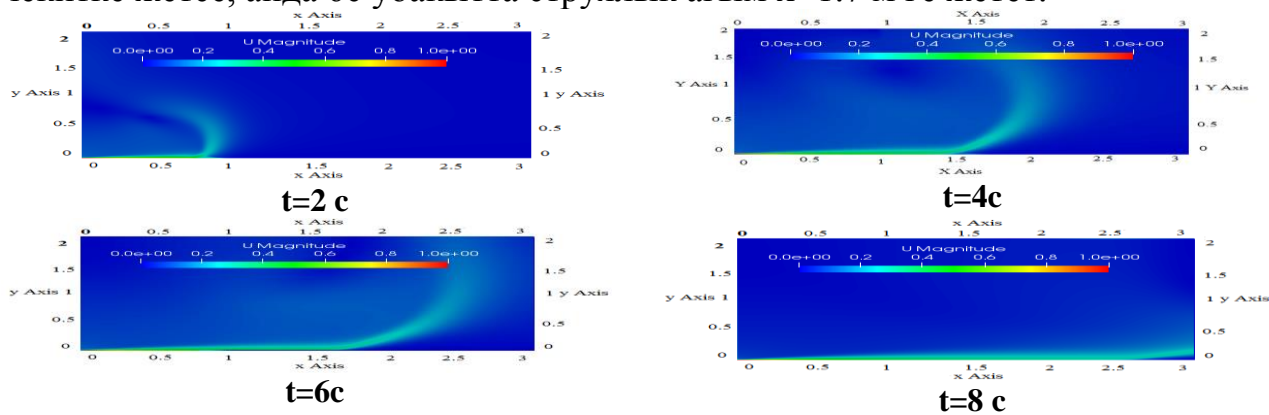


3.1-сүрөт . Маселенин геометриясы жана аймактын чек аралары

Сандык модель. «Атмосфера» 3.1-сүрөтүндө көрсөтүлгөн жогорку чектеги ылдамдык үчүн pressInletOutletVelocity шарты ылдамдык модулунун нөлдүк мааниси менен белгиленет. Басым шарты динамикалык басымды камтыган totalPressure катары берилет. Эсептөө доменинин дубалдарында ылдамдык үчүн тайгаланбоо шарты орнотулган (ылдамдык OpenFOAM пакетинде noSlip чектик шарты менен аныкталган 0 м/с га барабар), басым үчүн нөлдүк градиент шарты коюлган. Маселе эки өлчөмдүү болгондуктан, алдыңкы«front» жана арткы«back» чектер үчүн атайын OpenFOAM чек шарты «empty»колдонулат.

Турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясынын мааниси кириште төмөнкүгө барабар $k_{\text{кир}} = 1.5(u_0)^2 = 0.00015 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\omega_{\text{inlet}} = \varepsilon_{\text{inlet}}/k_{\text{inlet}} = 2.08 \text{ с}^{-1}$ жана тиешелүү диссипация ылдамдыгы $\varepsilon_{\text{inlet}} = (C\mu)^{0.75} (k_{\text{inlet}})^{1.5} / L = 0.093 \text{ м}^2/\text{с}^3$, мында L – турбуленттик узундуктун шкаласы, жылчыктын бийиктигине карата алынган.

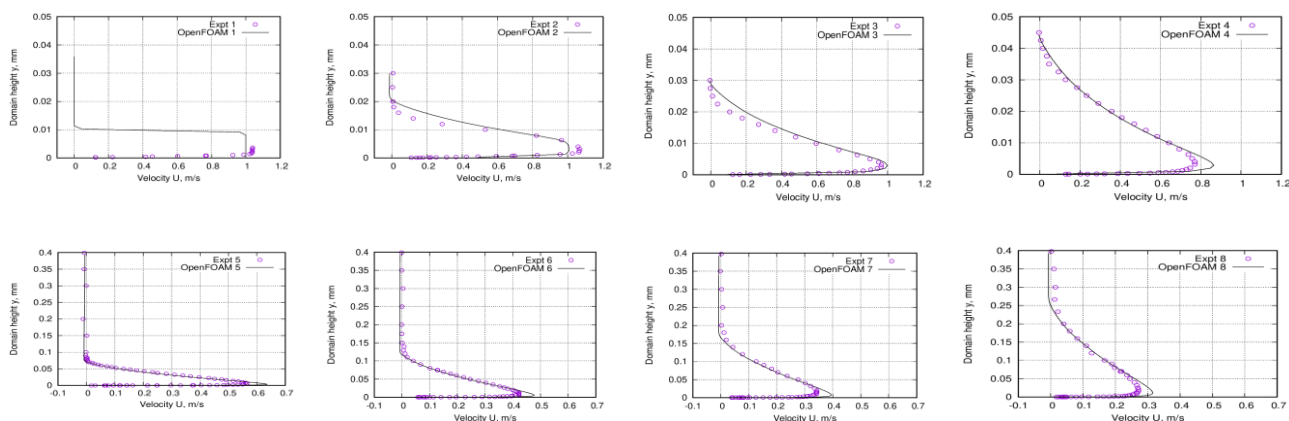
Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы. 3.2-сүрөттө Paraview пакетинин жардамы менен алынган t убакыттын ар кандай моментиндеги U ылдамдык модулунун талаалары көрсөтүлгөн. Ылдамдык векторунун талаасы бирдей эмес. Эгерде 4с убакытта струялык агым 1.5 м чекитке жетсе, анда 6с убакытта струялык агым $x=1.7 \text{ м}$ ге жетет.



3.2-сүрөт. Убакыттын ар кандай моментиндеги ылдамдык модулунун талаалары

Ар кандай сегиз түрдүү кесилиштердеги узунунан ылдамдыктын вертикалдык профилдерин $x/d=0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 150$ төмөн агымдагы тиешелүү эксперименттик маалыматтар менен салыштыруу 3.3-сүрөттө көрсөтүлгөн. Бул сүрөттө маркерлер Eriksson J; Karlsson R.I; Persson J(1998)

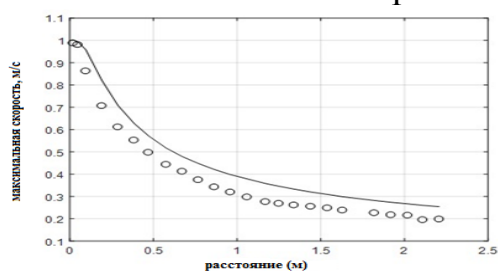
ишинин эксперименталдык маалыматтарына туура келет, түз сызык - бул иштин сандык натыйжалары.



3.3-сүрөт. Ар түрдүү тилкелердеги узунунан кеткен ылдамдыктын вертикалдык профилдери

3.3-сүрөттө көрүнүп тургандай, узунунан ылдамдыктын туурасынан кеткен профилдери боюнча эсептелген жана эксперименталдык маалыматтардын ортосундагы дал келүүчүлүк кыйла жакшы деп эсептөөгө болот. $x=0.048\text{м}$ кесилишке чейин эсептөөлөрдөгү максималдуу ылдамдык 8% га төмөндөгөн. $x=0.096\text{м}$ кесилиште дал келүүчүлүк жакшы, бирок андан ары эсептөө 9%-13% чегинде узунунан ылдамдыктын ашыкча маанисин берет.

3.5-сүрөттө агымдын төмөн жагындагы ар кандай кесилиштердеги 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% түзөт.



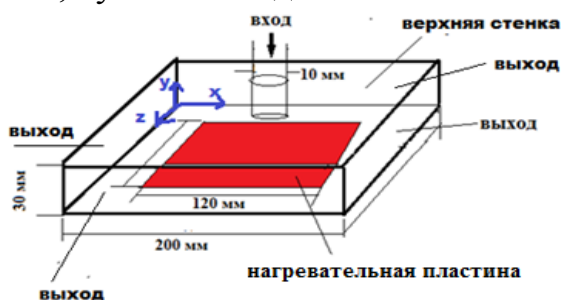
3.6-сүрөт. Дубалга жакын струялык агымдын максималдуу ылдамдыгынын профили.

2-Маселе. Жылытуу пластинасын сокку агымы менен муздатууну сандык моделдөө.

Бул маселенин максаты муздатуу процессине түшкөн турбуленттүү аба агымынын Рейнольдс санынын таасирин изилдөө. Диссертациялык иштин маанилүү аспектиси болуп ысытылган плита менен аба агымынын ортосундагы жылуулук алмашуу процессинин математикалык моделинин адекваттуулугун текшерүү маселеси саналат.

Маселенин коюлушу. Моделдештирилген маселенин диаграммасы жана эсептөө аймагынын чектери 3.7а-сүрөттө көрсөтүлгөн жана E. Baydar, Y. Ozmen (2006) эксперименталдык иштеринин геометриясына туура келет. 306K 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.



3.7а-сүрөт-Эсептөө аймагынын геометриясы

Бул маселенин максатына жетүү үчүн, түшкөн струялык 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.

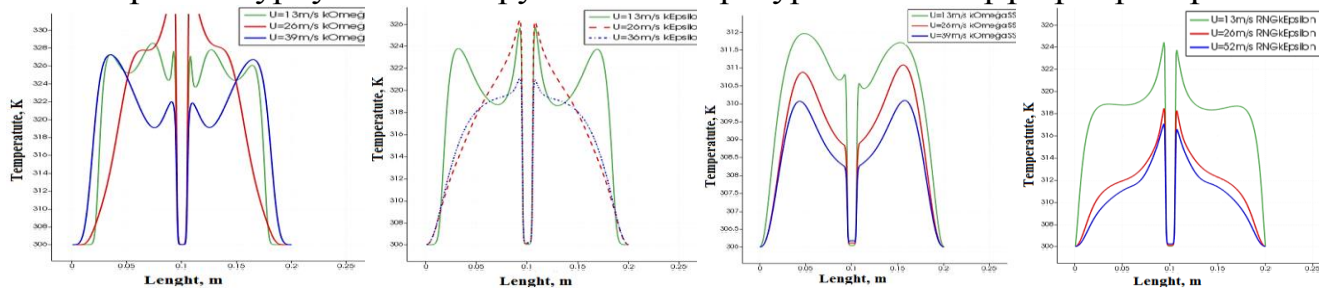
Математикалык модели. Каралып жаткан маселе убакыттын туундуларын эсепке албастан (3.1-3.4) теңдемелерге негизделген. Турбуленттүү пульсациялардын агымдын орточо ылдамдыгына таасири `buoyantkEpsilon`, `kEpsilon`, `kOmega`, `kOmegaSST`, `RNGkEpsilon` жана `RNGkEpsilon` турбуленттүү моделдерин колдонуу менен эске алынган.

Сандык модель. Эксперименттик шартка ылайык, тегерек струя вертикалдуу түтүк аркылуу 39 м/с ылдамдыкта берилип, ысытылган пластинадан урулгандан кийин аймактын 4 каптал бети аркылуу эсептик аймактан чыгат. Турбуленттүүлүктүн интенсивдүүлүгү бардык эсептөө учурлары үчүн 5%га барабар коюлган. Эксперимент 3472.22 Вт/м² кубаттуулуктагы туруктуу, бирдей жылуулук агымын пайда кылган жылытуу плитасын муздатууга багытталган. Туруктуу градиентти эсептөө үчүн жылуулук агымы менен температура градиентинин ортосундагы байланышты эстеп көрөлү: $q = \lambda \cdot |\nabla T|$, мында λ алюминийдин жылуулук өткөрүмдүүлүк коэффициенти. Бул жерден $\nabla T = q/\lambda = 3472.22/0.02699298 = 128634.09 \text{ K/m}$. Кириште жана чыгышта белгиленген температуралык маанилер белгиленет, ал эми калган үч дубал `zeroGradient` абалына ээ, бул физикалык жактан алар аркылуу жылуулук алмашуунун жоктугун билдирет - дубалдардын адиабаттык абалы.

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.

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

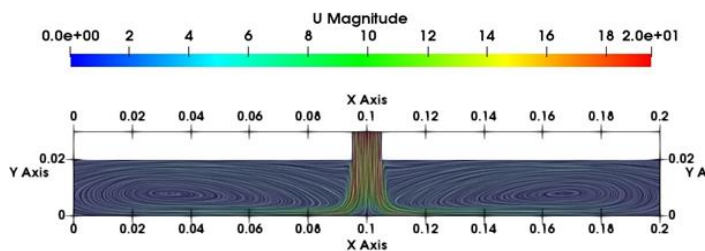
3.7-сүрөттө Ох огуна параллелдүү орточо бийиктиктеги сызык боюнча, координаталары (0, 0.015, 0.1) жана (0.2, 0.015, 0.1) менен туташтыруучу чекиттер ар кандай мааниде (13м/с, 26м/с, 39м/с) Рейнольдс саны 8000, 16000, 24000 түшкөн турбуленттик струянын температурасынын өзгөрүшү көрсөтүлгөн.



3.7-сүрөт. Турбуленттүүлүктүн ар кандай моделдери үчүн ылдамдык талаасынын бөлүштүрүлүшү

Минималдуу температурасы $T = 306$ K чекит струянын токтоп калуу зонасы менен дал келерин көрүүгө болот. Агылчак (струя) 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 модулуна изосызыктарын көрсөтөт.

Бул сүрөттө эки карама-каршы багытта айланып, $x=0.1$ м чекитке салыштырмалуу симметриялуу эки куюндун пайда болушу көрсөтүлгөн, борборлору ($x \approx 0.035$ м, $x \approx 0.165$ м) эки тараптан болжол менен $x \approx 0.065$ м аралыкта жайгашкан.



3.9-сүрөт – Тегиздиктеги ылдамдык модулуна изосызыктары $z=0.1$ м

Экинчиден, температура талаасынын алынган сандык маанилеринин ишенимдүүлүгү тиешелүү эксперименталдык маалыматтар менен салыштыруу жолу менен текшерилет. 3.6в таблицада. Температуранын сандык маанилерин жылытуу пластинасынын бетиндеги 21 чекитте өлчөнгөн эксперименталдык маалыматтар менен салыштыруу ($y=0$ боюнча) каралып жаткан беш турбуленттүү моделдер үчүн берилген – buoyantkEpsilon, kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG Рейнольдс саны үчүн $Re=24,000$.

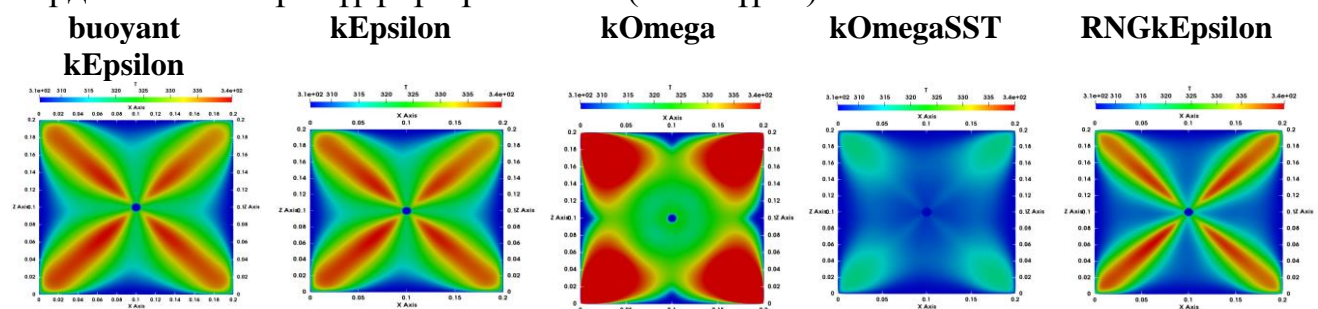
3.6 в-таблица.-Температураны салыштыруунун салыштырмалуу каталары

| № | 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 |
| Орточо каталык | | 0.604506 | 0.604811 | 0.747667 | 1.121502 | 1.068405 |

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

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



3.10-сүрөт - 39 м/с кириш ылдамдыгында температура талаасынын жер бетинде бөлүштүрүлүшү

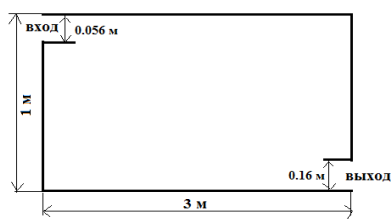
Каралган моделдердин ичинен төртөө болжол менен бирдей температура талаасын берет, ал эми kOmegaSST башка натыйжа берет - жылытуу плитасы менен агымдын ортосундагы жылуулук алмашуу жогорулайт.

3-Маселе. Бөлмө моделиндеги абанын кыймылына кириш агымынын турбуленттүүлүгүнүн таасирин моделдөө.

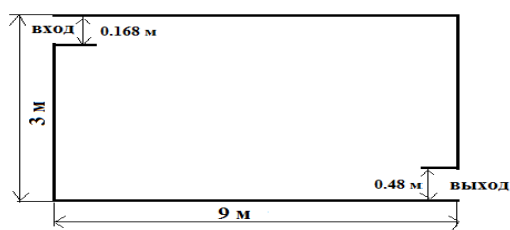
Бул маселенин максаты $3\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$ жана $9\text{м} \times 3\text{м} \times 1\text{м}$ өлчөмдүү эки геометриялык окшош бөлмө моделдеринде кириш агымынын турбуленттүүлүгүнүн даражасынын агым талаасына таасирин изилдөө болуп саналат.

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 $u_0 = 1.3$ м/с (3.11а-сүрөт) жана $u_0 = 0.455$ м/с (3.11б-сүрөт) ылдамдыгы менен бөлмө моделине кирет.



3.11а-сүрөт. 3м×1м×1м моделдин геометриясы

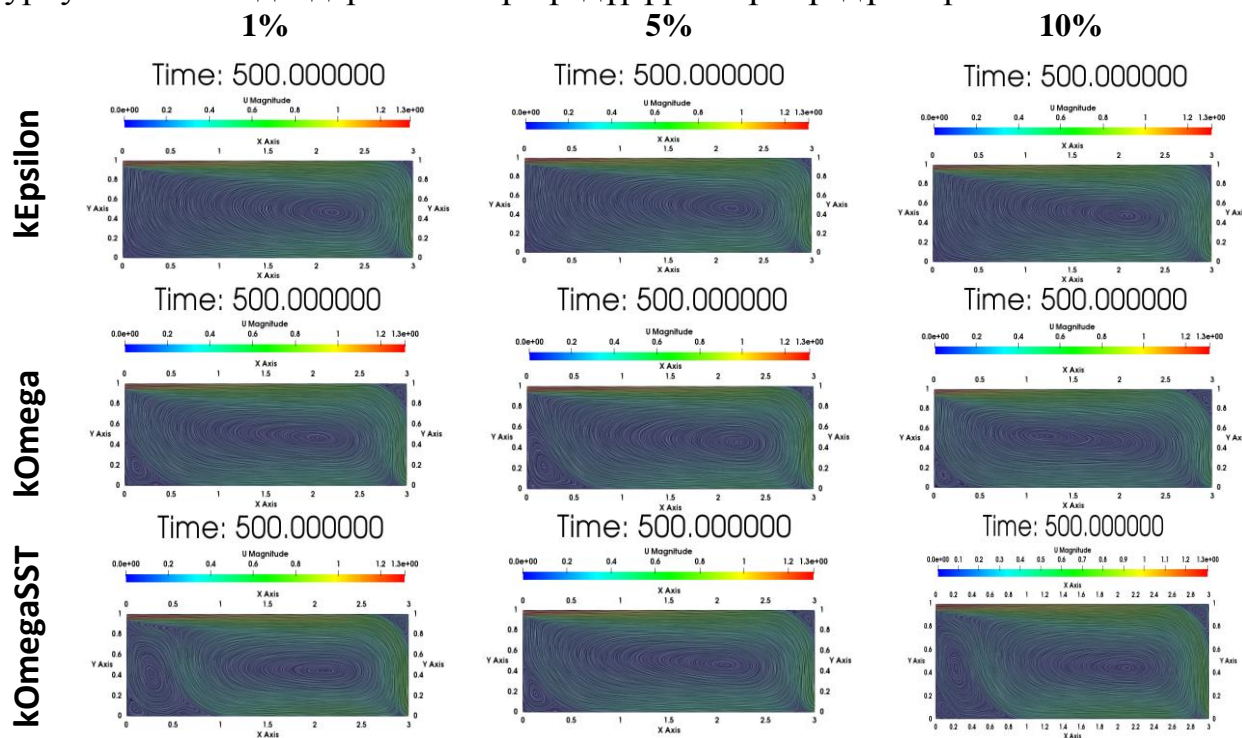


3.11б-сүрөт. 9м×3м×1м моделдин геометриясы

Биринчи моделдин бийиктиги $H=1$ м, экинчи моделде $H=3$ м, моделдердин узундугу тиешелүүлүгүнө жараша 3м жана 9м. 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 RestiveA.M эксперименталдык иштерине туура келет (1979).

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

Сандык эсептөөлөрдүн жана талкуулардын жыйынтыгы. Аба агымынын структурасы 3.12-сүрөттө көрсөтүлгөн, анда ар бир турбуленттүү модель үчүн убакыттын бирдей моменттери үчүн ылдамдык модулуунун изолиниялары көрсөтүлгөн. Тор үч учурда тең бирдей, бул агымдагы айырмачылыктарды эки өлчөмдүү агымды жана турбуленттүүлүктүн интенсивдүүлүгүн 1%, 5% жана 10% болжолдоо үчүн колдонулган турбуленттик моделдер менен түшүндүрүүгө мүмкүндүк берет.



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

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

модел
и

kEpsilon

3×1
1H

9×3
1H

kOmegaSST

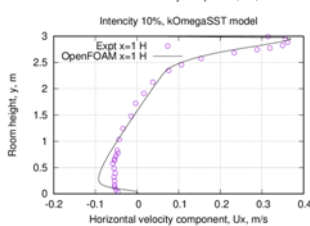
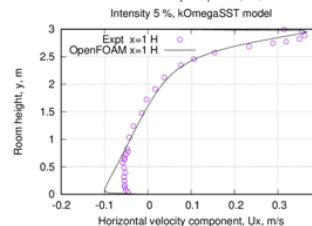
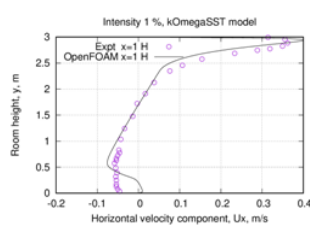
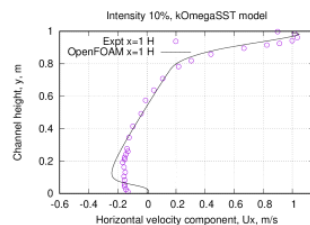
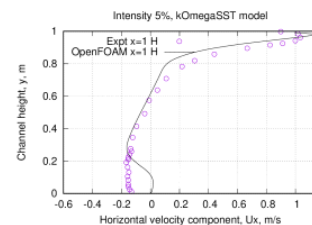
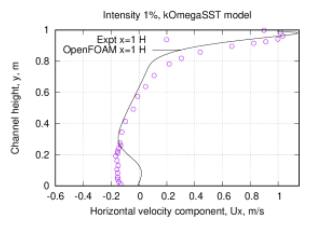
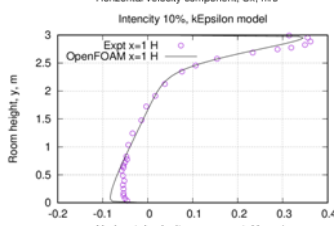
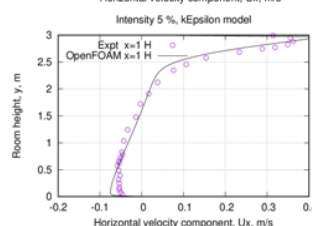
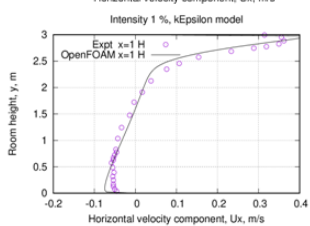
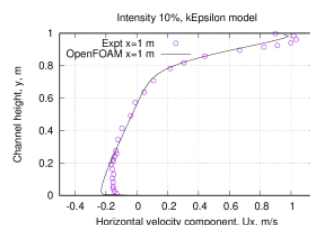
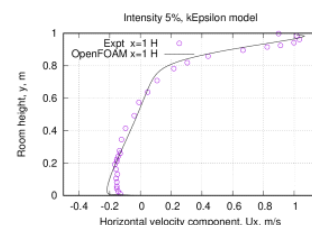
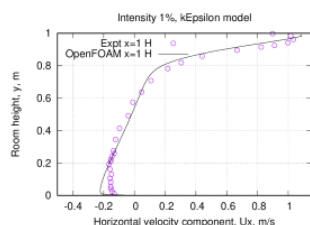
3×1
1H

9×3
1H

1%

5%

10%



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

1%

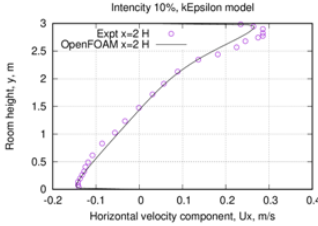
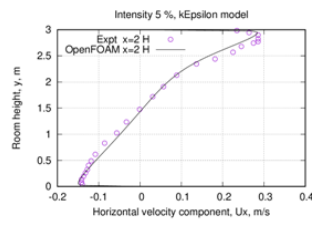
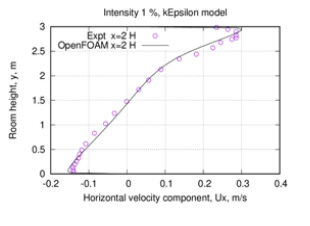
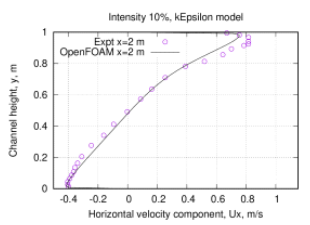
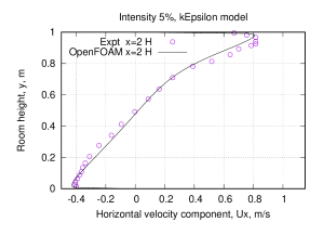
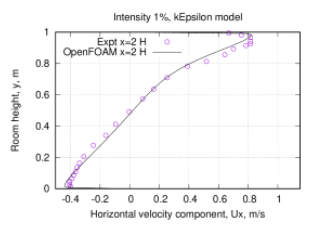
5%

10%

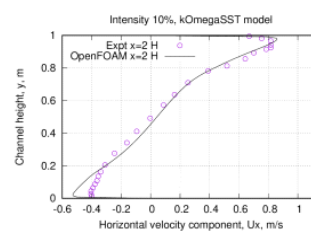
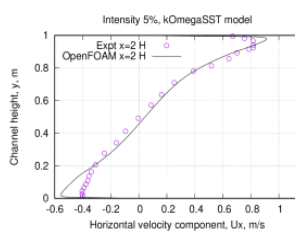
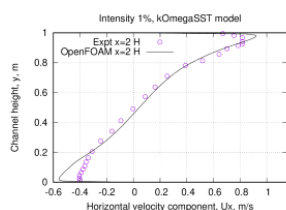
kEpsilon

3×1
2H

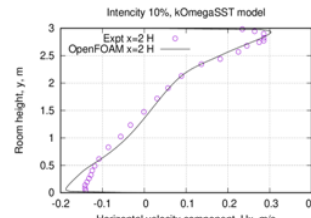
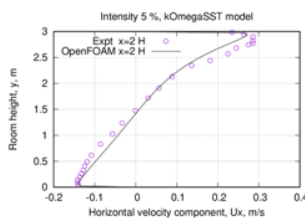
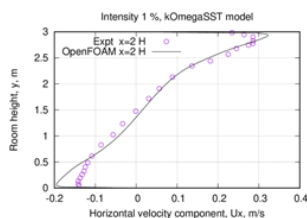
9×3
2H



3×1
2H



9×3
2H



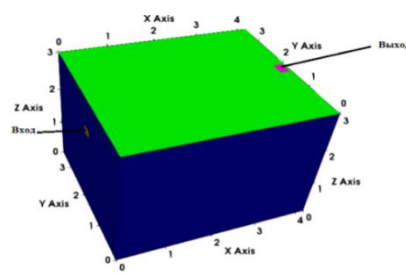
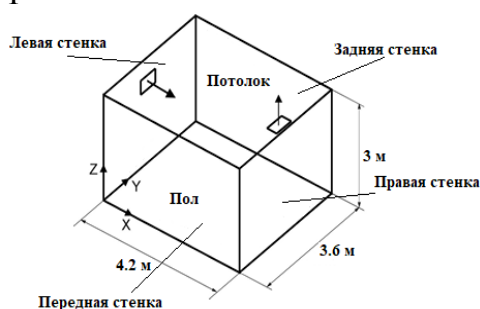
3.14-сүрөт. $x = 2H$ кесилишиндеги орточо ылдамдыктын вертикалдык профилдери.

Эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк $k-\omega$ SST моделин 5% интенсивдүүлүктө колдонууда начарлайт. Биздин эсептөөлөр боюнча, тиешелүү каталар 9.4% барабар болгон.

4-Маселе. Бөлмөдөгү абанын жашоо убактысын сандык моделдөө

Бул маселенин максаты импульстун өтүү теңдемесинде конвективдик терминди дискреттөө ыкмаларынын бөлмөдөгү аба агымынын сапатына тийгизген таасирин сандык жактан изилдөө болуп саналат.

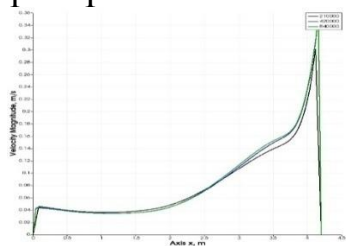
Маселенин коюлушу. Өлчөмдөрү $4.2 \text{ м} \times 3.6 \text{ м} \times 3.0 \text{ м}$ болгон тик бурчтуу бөлмөдөгү аба агымынын кыймылын моделдештирүү маселеси каралат (сүрөт 3.15). Өлчөмү $0.3 \text{ м} \times 0.2 \text{ м}$ болгон аба кирүүчү тешик сол дубалда, полдон 2 м бийиктикте жайгашкан. Тик бурчтуу кирүүчү тешиктин борбору $(0, 1.8, 2.15)$ координатасында жайгашкан (сүрөт 3.16, сол жакта). Аба чыгуучу тик бурчтуу тешик шыпта, оң дубалга жакын жерде жайгашып, өлчөмү $0.3 \text{ м} \times 0.2 \text{ м}$ түзөт. Колдонулган математикалык моделдин ылайыктуулугу жана сандык жыйынтыктардын ишенимдүүлүгү Batrak M. жана башкалардын (2001) эмгегиндеги эксперименттик маалыматтар менен салыштыруу жолу менен текшерилет.



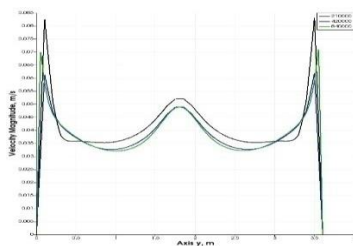
3.15-сүрөт. Бөлмөнүн гексаэдрдик модели (солдо) жана эсептөө домени (оңдо)

Аба берүүчү агымдын орточо ылдамдыгы 1.68 м/с түзөт, ал эми анын температурасы 23°C ге барабар. Кирүү ылдамдыгы жана кирүүчү тешиктин аянты аркылуу эсептелген абанын көлөмдүк чыгымы эсеп аймагына киргенде төмөнкүчө болот: $Q = U_{in} * S = 1.68 * 0.3 * 0.2 = 0.1008 \text{ м}^3/\text{с}$. Эсептик аймактын көлөмү 45.36 м^3 түзөт.

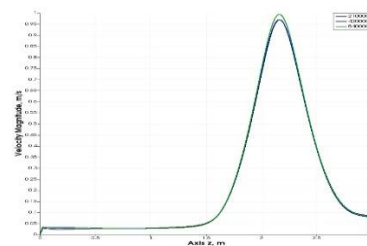
Сандык модель. Эсептик торчонун каныгуу таасирин изилдөө үчүн эсептөөлөр ар кандай контролдук көлөмдөрдүн саны менен 4 түрдүү торчо үчүн жүргүзүлгөн: 210000, 420000 жана 840000. Үч эсептик торчо үчүн ылдамдык модулунун профилдеринин салыштыруусу 3.17-сүрөттө көрсөтүлгөн.



Х огу боюнча



Ү огу боюнча



Z огу боюнча

Колдонулган үч торчонун ичинен эсептөө убактысы жана сандык чечимдердин алгылыктуу тактыгы боюнча эң ылайыктуусу жалпы саны 840 000 уячадан турган эсептөөчү торчо болгон. Төмөндө берилген сандык натыйжалар бул эсептөө торчосуна туура келет.

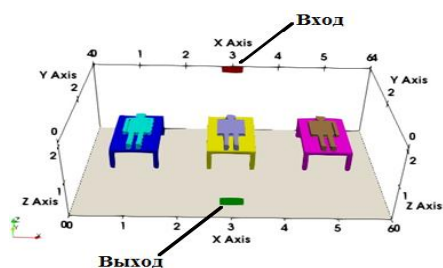
Сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктары жана талкуусу. Аба жашынын сандык моделдөөнүн жыйынтыктарын 3.12-таблицасында берилген эксперименттик маалыматтар менен салыштыруу жетишерлик жакшы дал келүүнү көрсөтөт. Эң аз айырма Linear Upwind жана QUICK дискреттештирүү схемалары үчүн байкалат, бул учурда салыштырмалуу ката болжол менен 12% түзөт. Бул тапшырмада эң начар схема — van Leer V, анын салыштырмалуу катасы 19.96% түзөт. Калган бардык дискреттештирүү схемалары болжол менен 13.5% деңгээлинде окшош тактыкты камсыздайт, бул алынган сандык жыйынтыктардын ишенимдүүлүгүн жана колдонулган математикалык моделдин ылайыктуулугун кыйыр түрдө тастыктайт.

Таблица 3.12. - Абанын сандык жашын эксперименталдык маалыматтар менен салыштыруу

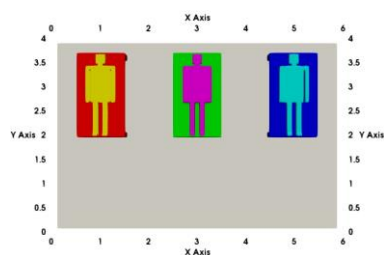
| | Experiment | Centered schemes | | | NVD | | TVD schemes | | | | Upwind convection schemes | | | |
|---|-------------------|------------------|--------|----------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------|---------------------------|---------------|--------|--------|
| | | cubic | linear | midPoint | Gamma | SFCD | limited Linear | minmod | MUSCL | vanLeerV | filtered Linear2 | linear Upwind | QUICK | upwind |
| 1 | 453. | 472.70 | 472.70 | 472.70 | 474.09 | 474.73 | 476.3 | 475.61 | 473.94 | 611.90 | 472.70 | 486.41 | 486.41 | 611.90 |
| | средняя ошибка, % | 13.506 | 13.506 | 13.506 | 13.364 | 13.305 | 13.18 | 13.204 | 13.47 | 19.961 | 13.506 | 11.943 | 11.943 | 16.851 |

5-Маселе. Инфекциялык палатанын моделинде абанын кыймылын моделдөө

Бул тапшырманын максаты — 6 м узундуктагы, 4 м туурасы жана 2.6 м бийиктиктеги (караңыз сүрөт 3.18 а,б) инфекциялык палатанын моделиндеги абанын ылдамдык талаасына терс чыгыш басымдын таасирин изилдөө.



3.15-сүрөт . Үч бейтабы бар бөлмөнүн модели

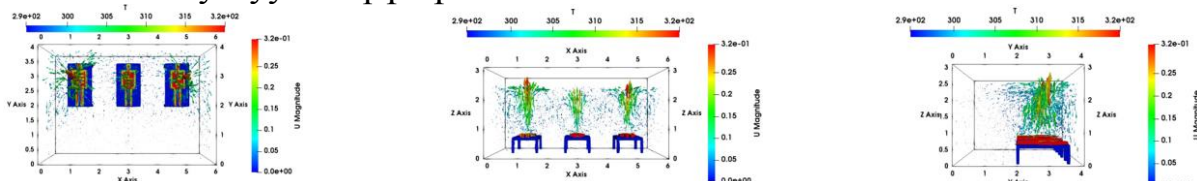


3.15б-сүрөт. Бейтаптарды жайгаштыруу схемасы

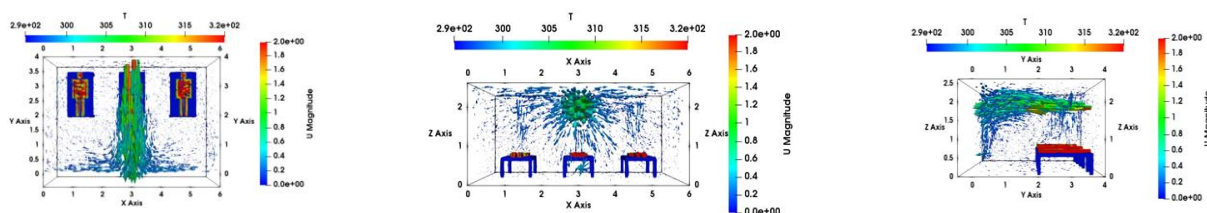
Координаттар системасынын башталышы сол каптал дубалдын төмөнкү жакынкы бурчунда жайгашкан. Кирүү жана чыгуу тешиктери $0.5 \text{ м} \times 0.2 \text{ м}$ өлчөмүндөгү тик бурчтуу формага ээ. Кирүү тешигинин геометриялык борбору арткы дубалда, координаттары (3, 4, 2.2) болгон чекитте жайгашкан, ал эми чыгуу тешигинин борбору алдыңкы дубалдагы (3, 0, 0.5) чекитинде жайгашкан. Эсептик аймакка кирип жаткан атмосфералык аба агымынын температурасы 295.15 К түзөт.

Сандык модель. Массанын, импульстун жана энергиянын сакталуу мыйзамдарын сүрөттөгөн теңдемелерди дискретизациялоо башкаруу көлөмдөрү ыкмасы менен ишке ашырылган. Пациенттин денеси менен палатанын айланасындагы аба агымынын ортосундагы жылуулук алмашуу 2-тапшырманын аналогдору катары OpenFOAM пакеттериндеги externalWallHeatFluxTemperature чекит шартын колдонуу менен, туруктуу жылуулук агымы 56.52 Вт/м^2 күчүндө ишке ашырылган.

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 $P_{out}=-4 \text{ Па}$ га чейин басым үчүн чектик шартты азайтуу бүлмө моделиндеги бүтүндөй агымдын схемасынын олуттуу өзгөрүшүнө алып келет.

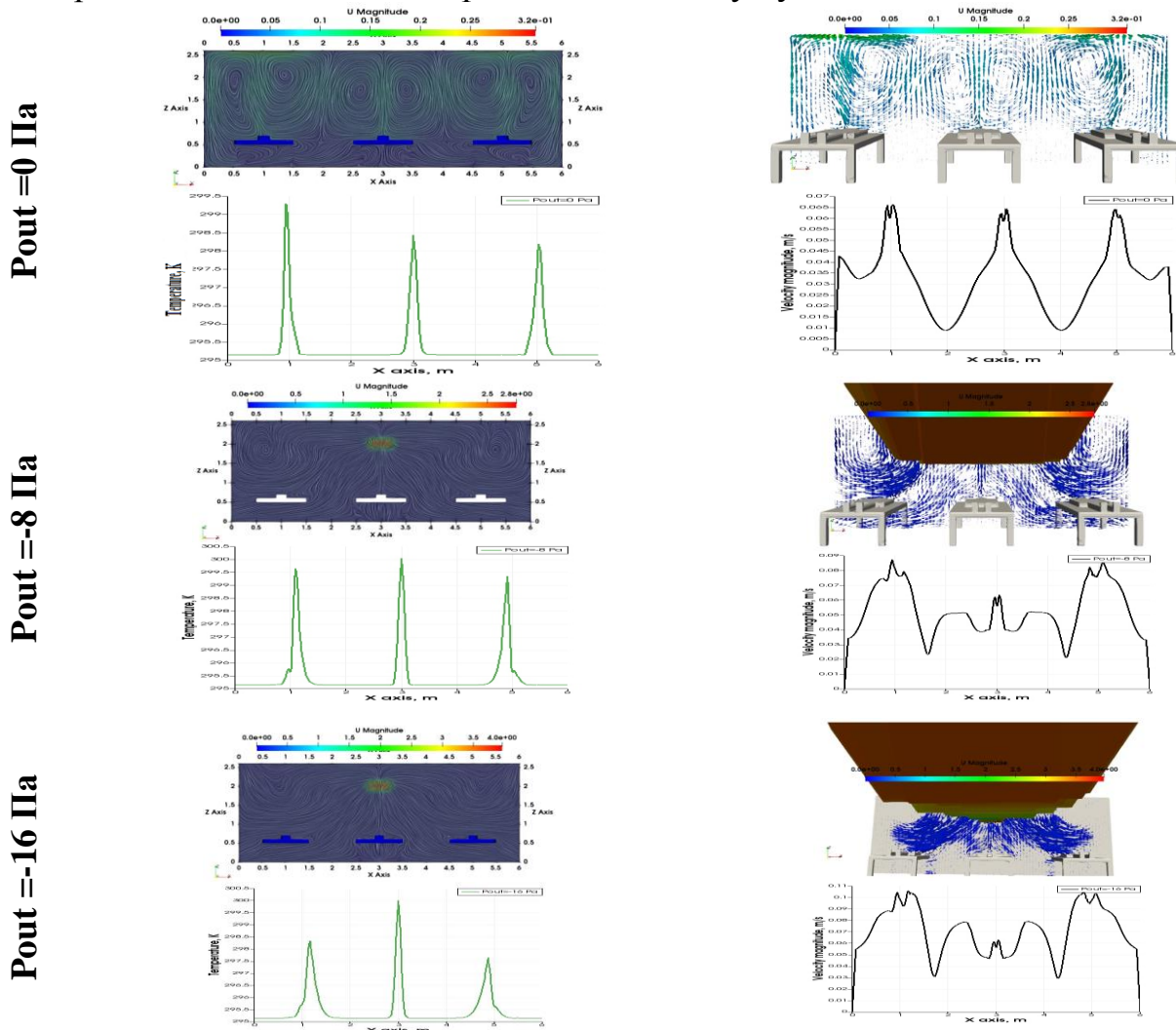


3.16-сүрөт - ХоY (солдо), ХоZ (орттодо) жана YoZ (оң) тегиздигинде $P_{out} = 0 \text{ Па}$ басымдагы ылдамдык вектордук талаасы.



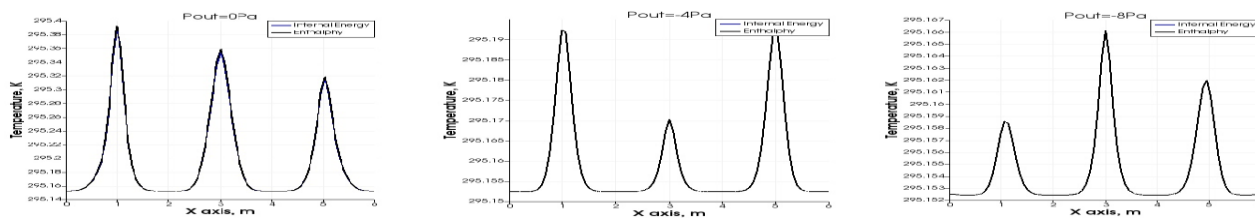
3.17-сүрөт - ХоУ (солдо), ХоZ (орттодо) жана УоZ (оң) тегиздигинде $P_{out} = -4$ Па басымдагы ылдамдык вектордук талаасы.

3.17-сүрөттөн көрүнүп тургандай, алынган температуранын жана орточо ылдамдыктын (Ох оосунан бойлой) симметриялык узундукту профили максималдуу ката менен 2.69% жана 5.67% түзөт. $P_{out} = 0$ Па учурда Рэйли-Бенар конвективдик клеткаларынын пайда болушу байкалат.

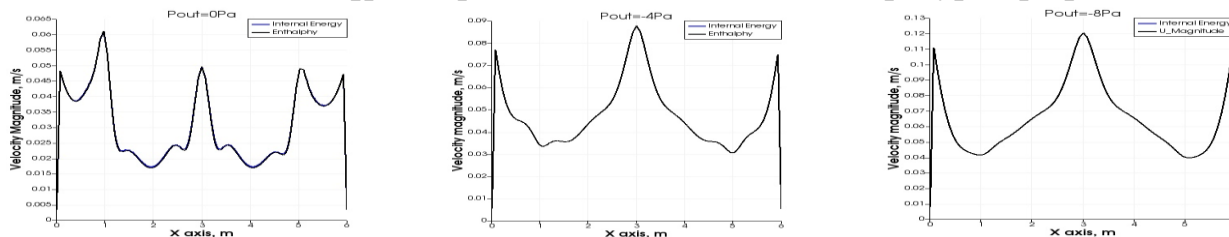


3.21-сүрөт. Изосызыктар жана ылдамдык талаасы, температура жана ылдамдык профилдери.

Бул графиктерди салыштыруу температура агымындагы максимумдардын сол жана оң дубалдарга жакын жерден палатанын борбордук бөлүгүнө карай жылышып кетүүсүн көрсөтөт, бул таза эркин конвекциянын ($P = 0$ Па) жагдайы менен салыштырганда байкалат. Бул жылышуу терс чыгуу басымынын күчөшү менен көбөйөт. 3.22-3.23-сүрөттөрдө температура жана ылдамдык боюнча узундукту профилдеринин эсептөө жыйынтыктарын эки термодинамикалык модель боюнча салыштыруу берилген, мында көк түс ички энергияны, ал эми кара түс энтальпияны билдирет. Профилдер Ох оосуна параллель горизонталдуу сызык боюнча алынган жана палатанын геометриялык борбору аркылуу өтөт.



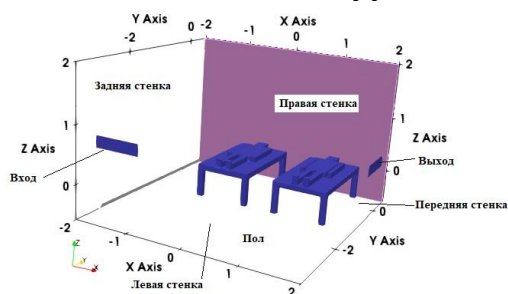
3.22-сүрөт-Ар кандай басымдагы температура профили



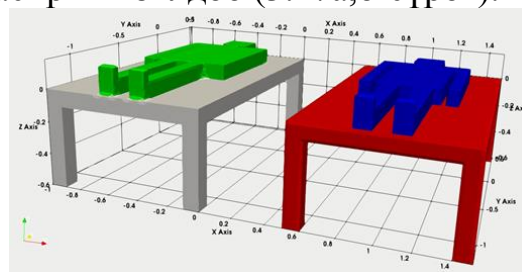
3.23-сүрөт - Ар кандай басымдагы ылдамдык модулунын профили

$P_{out} = 0$ Па дан $P_{out} = -8$ Па га чейин түшүрүү палатанын моделиндеги агымдын бардык сүрөтүнүн олуттуу өзгөрүүлөрүнө алып келет. Температуранын аба агымындагы эсептөөлөрү үчүн OpenFOAM пакетинде эки термодинамикалык модель колдонулуп, сандык эсептөөлөр жүргүзүлдү. Жалпы алганда, модельдердин ортосундагы дал келүү абдан жакшы, бирок $x = 0.5$ м, $x = 2$ м, $x = 4$ м жана $x = 5$ м кесилиштеринде 1.8% ашпаган кичине айырмачылыктар байкалат.

6-Маселе. Инфекциялык палатанын моделинде стационардык эмес аба кыймылын моделдөө. Бул тиштин максаты — $4 \times 4 \times 2.6$ м өлчөмүндөгү инфекциялык палатанын моделиндеги стационардык эмес аба агымындагы ылдамдык талаасына чыгуу басымынын таасирин изилдөө (3.27а,б-сүрөт).



а)



б)

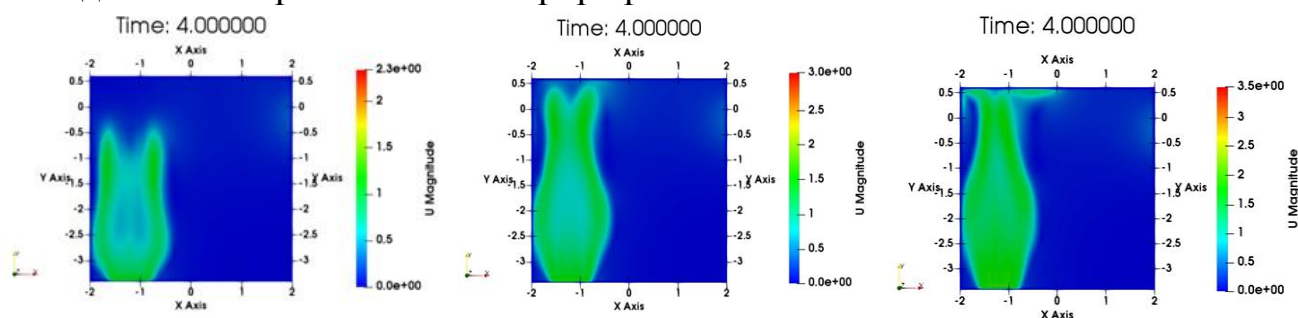
3.24-Сүрөт – Маселенин геометриясы (а) жана керебети бар пациенттер (б)

Маселенин коюлушу. Кирүү жана чыгуу тешиктери $0.8 \text{ м} \times 0.2 \text{ м}$ өлчөмүндөгү тик бурчтуу формага ээ, ал эми чыгуу тешиги оң каптал дубалда жайгашкан. Эсептик аймакка кирип жаткан атмосфералык аба агымынын температурасы 295.15 К түзөт. Маселеде абанын стационардык эмес желдетүү процессинин сапатын аныктоо, ал үчүн ылдамдык жана абанын жашынын модулу салыштыруу керек. Бул салыштыруулар эки чекитте жүргүзүлөт, алардын координаттары $(-0.5 \ 0.4 \ 0.1)$ жана $(1.0 \ 0.4 \ 0.1)$, бул чекиттер эки пациенттин жүздөрүнө жакын жайгашкан.

Сандык модель. Ылдамдык модулу жана басымдын баштапкы маанилери нөлгө барабар, эсептик аймакта агымдын температурасы 295.15 К түзөт. Кирүү басымы 4.5×10^{-5} Па деп кабыл алынган, ал эми чыгуу басымы 4.5×10^{-5} Па, -4Па, -8Па, -12Па жана -16 Па болуп аныкталган. Кирүү

температурасы 295.15 К, ал эми чыгуу, керебет жана палатанын дубалдарында температура үчүн адиабаттык шарт коюлган — чектөө аркылуу жылуулук алмашуу жок. Пациенттин бетиндеги температуранын чек ара шарты 2-маселедей коюлган, пациенттин денесинен палатанын айланасындагы аба агымына 56.52 Вт/м^2 туруктуу жылуулук агымы бөлүнүп чыгып жаткандыгы эске алынат.

Сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктары жана талкуусу. Аба агымынын ылдамдыгынын модулунун талаасы горизонталдуу тегиздикте $z = 0.7 \text{ м}$ келтирилген, ал төмөнкү бөлүгү кирүү тешигинин жанына тийиш. Бул тегиздик аркылуу чыгуу тешигинин астындагы чекиттин бөлүгү өтөт. Бул жерде, чыгуу чегиндеги басымдын мааниси -4 Па болгондо, тик бурчтуу агымдын төмөнкү чекитинин бөлүнүшү ачык байкалат.



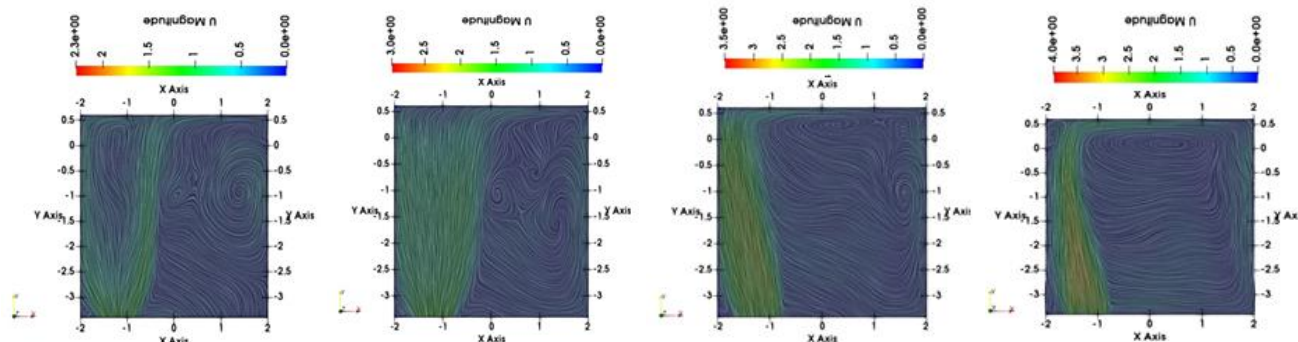
Pout= - 4 Па.

Pout= - 8 Па.

Pout= - 12 Па.

3.25-Сүрөт - Ар түрдүү басымдардагы $z = 0.7 \text{ м}$ тегиздиктеги ылдамдык модулунун талаасы.

Жагдай үчүн, инфекция палатасынын модельинин чыгуу басымы -12 Па болсо, агымдын сүрөтү таптакыр башкача — бул жерде агымдын алды фронтунун төмөнкү четинин бөлүнүшү жок. Струянын салыштырмалуу чоң ылдамдыгынын натыйжасында анын формасы дээрлик симметриялуу бойдон калат, бул 3.28-сүрөттө так көрсөтүлөт. Кийинки 3.26-сүрөттөрдө рециркуляция зонасы так көрүнөт, анын интенсивдүүлүгү инфекция палатасынын моделинин басымы үчүн терс чыгуучу чек ара шарттын модулунун жогорулашы менен өсөт, бул агымды бөлмөнүн арткы дубалына бурууга алып келет.



Pout=-4Па.

Pout=-8Па.

Pout=-12Па.

Pout=-16Па.

3.26-сүрөт — Ар кандай басымдардагы $z = 0.7 \text{ м}$ тегиздигиндеги ылдамдык модулунун изолиниялары.

Бөлмө моделинин чыгыш бөлүгүндө чек ара шарты катары терс басымдын абсолюттук маанисинин көбөйүшү бөлмөнүн желдетилишин жакшыртарын көрсөткөн. Бирок, бул өз кезегинде ылдамдык модулуна 0.2 м/сден жогорулашына алып келип, бул бейтаптарда сквозняк сезимин жаратат.

Корутундулар диссертацияда алынган негизги жыйынтыктарды берет.

Тиркемеде 2 ишке ашыруу сертификаты, программалык камсыздоого өтүнмө боюнча Кыргызпатенттин 2 сертификаты, ар кандай конференцияларга катышуунун 4 сертификаты камтылган.

КОРУТУНДУ

Диссертациянын негизги натыйжалары төмөнкүлөр:

1. Өлчөмдөрү $3 \times 1 \times 1$ жана $9 \times 3 \times 1$ бөлмө моделдеринде эки геометриялык окшош вертикалдуу кесилиштерде агымдардын окшоштугу алынган. Эксперименталдык маалыматтар менен сандык эсептөөлөрдүн ортосундагы окшоштук $k-\omega$ SST моделинде 5% интенсивдүүлүктө эң начар экендиги көрсөтүлгөн.

2. Терс басымдагы жугуштуу оорулар бөлүмүнүн моделинде абанын кыймылын уюштурууга басым үчүн чыгуу чек ара шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Инфекциялык палатанын моделиндеги чыгуу басымынын терс маанилери боюнча орточо ылдамдык профили нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу, тиешелүүлүгүнө жараша -8 Па жана -16 Па 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

3. Кыймылсыз бейтаптарды жайгаштыруу менен жугуштуу оорулар бөлүмүндө колдонулуучу желдетүү схемасы керектүү ылдамдыктын ыңгайлуулугун камсыздай тургандыгы - абанын ылдамдыгы 0.2 м/с ашпаганы көрсөтүлгөн, бул бөлмө эргономикасы боюнча эл аралык стандарттын талаптарына жооп берет.

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 Таттыбүбү., 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 Международной 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://vestniksucta.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

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>

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

Ачкыч сөздөр: турбуленттүү агым, жылуулук өткөрүмдүүлүк, бөлмөдөгү терс басым, түшүү агымы, дубал агымы, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Изилдөөнүн объектиси: турбуленттүү струялык агым.

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

Изилдөөнүн максаты бөлмө моделиндеги аба кыймылынын мисалын колдонуу менен OpenFOAM тиркеме пакетинин алкагында турбуленттүү струялык агымдарды моделдөө ыкмасын иштеп чыгуу болуп саналат.

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

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы.

- $3 \times 1 \times 1$ 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.

- терс басымдагы инфекциялык палатанын моделинде абанын кыймылын уюштурууга басымга чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Инфекциялык палатанын моделинин чыгуу басымынын терс маанилеринде -8Па жана -16Па орточо ылдамдык профили нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтапка ылайыкталган жугуштуу оорулар бөлүмүнүн сунуш кылынган конструкциясы керектүү ылдамдыктын ыңгайлуулугун камсыздай турганы – абанын ылдамдыгы 0.2 м/с ашпаганы көрсөтүлгөн.

Колдонуу көлөмү же колдонуу боюнча сунуштар. Изилдөөнүн натыйжалары жылуулук алмашуу процесстерин эске алуу менен инфекциялык

бөлмөнүн моделинде абанын кыймылын уюштуруу үчүн пайдаланылышы мүмкүн.

Колдонуу чөйрөсү. Изилдөөнүн натыйжалары терс басымдагы инфекциялык бөлүмдөрдүн моделинде абанын кыймылын оптималдаштыруу максатында Кара-Суу аймактык ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлүмүнүн ишмердүүлүгүнө киргизүү үчүн сунушталышы мүмкүн.

РЕЗЮМЕ

**диссертации 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, отрицательное давление помещения, падающая струя, пристеночная струя, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Объект исследования: турбулентное струйное течения.

Предметом исследования является численное моделирование влияния отрицательных граничных условий на движение воздуха в модели инфекционной палаты.

Целью исследования является развитие метода моделирования струйных турбулентных течений в рамках прикладного пакета OpenFOAM на примере движения воздуха в помещении.

Методы исследования. Численное интегрирование осреднённых по Рейнольдса трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих струйные турбулентные течения.

Научная новизна полученных результатов работы.

- 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 экспериментальными данными и численным расчётом для модели $k-\omega$ SST является наилучшим при интенсивности 5%.

- Проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления на организацию движения воздуха в модели инфекционной палаты с отрицательным давлением. Установлено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24% при отрицательных значениях выходного давления модели инфекционной палаты -8Па и -16Па соответственно, по сравнению с нулевым выходным давлением.

- Показано, что предложенная схема инфекционной палаты с размещением трёх пациентов обеспечивает необходимый скоростной комфорт – скорость воздуха не превышает значения 0.2м/с.

Степень использования или рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы для организации движения воздуха в модели инфекционной палаты с учетом процессов теплообмена.

Область применения. Результаты исследования могут быть предложены для внедрения в деятельности инфекционного отделения Карасуйской территориальной больницы с целью оптимизации движения воздуха в моделях инфекционных палат с отрицательным давлением.

SUMMARY

**dissertation of Abdimutalipova Zeynur Kanybekovna on the topic:
"Numerical modeling of turbulent jet flows" for the degree of candidate of
physical and mathematical sciences in the specialty 01.02.05 - "Mechanics of
liquids, gas and plasma".**

Key words: Turbulent flow, thermal conductivity, a negative pressure isolation space, falling jet, wall jet, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Object of study: turbulent jet flow.

The subject of the study is numerical modeling of the influence of negative boundary conditions on air movement in a model of an infectious diseases 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 air movement in the infectious ward of the Karasu Territorial Hospital.

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

Scientific novelty of the obtained results.

- 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%.
- Numerical modeling of the influence of the outlet boundary condition for pressure on the organization of air movement in a model of an infectious diseases ward with negative pressure was carried out. It was found that the average velocity profile increases by 6% and 24% at negative values of the outlet pressure of the infectious diseases ward model of -8 Pa and -16 Pa, respectively, compared to zero outlet pressure.
- It has been shown that the proposed design of an infectious diseases ward with accommodation for three patients provides the necessary speed comfort - the air speed does not exceed 0.2 m/s.

Extent of use or recommendations for use. The results of the study can be used to organize air movement in a model of an infectious disease ward, taking into account heat exchange processes.

Application area. The results of the study can be proposed for implementation in the activities of the infectious diseases department of the Karasuy territorial hospital in order to optimize air movement in models of infectious diseases wards with negative pressure.

