И. Арабаев атындагы
Кыргыз мамлекеттик университети

И. Раззаков атындагы
Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Диссертациялык кеңеш Д 05.23.689

Кол жазма укугунда
УДК 681.5

Калмурзаева Анипа Ташбаевна

Контролдук көлөмдөр ыкмасынын эсептөө каталарын анализдөө

05.13.16 – илимий изилдөөлөрдө эсептөө техникаларын, математикалык моделдөөнү жана математикалык методдорду колдонуу

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

Бишкек - 2024

Диссертациялык иш Баткен мамлекеттик университетинин М. М. Тайиров атындагы Кызыл-Кыя гуманитардык педагогикалык институтунун табигый-математикалык билим берүү кафедрасында аткарылган.

Илимий жетекчи:	Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, физика-математика илимдеринин доктору, доцент, Ош мамлекеттик университетинин математика жана табигый илимдер кафедрасынын башчысы
Расмий оппоненттери:	Скляр Сергей Николаевич, физика-математика илимдеринин доктору, профессор, Борбордук Азиядагы Америка университетинин колдонмо математика жана информатика кафедрасынын башчысы Султанов Райымбек Касымович, физика-математика илимдеринин кандидаты, доцент, Кыргыз-Турк Манас университетинин компьютердик инженерия бөлүмүнүн башчысы
Жетектөөчү мекеме:	Академик М.М.Адышев атындагы Ош технологиялык университетинин кибернетика жана маалыматтык технологиялар факультетинин эсептөө техникасын жана автоматташтырылган системаларды программалык камсыздоо кафедрасы (723503, Ош, Н. Исанов көч.-81)

Диссертацияны коргоо 2024-жылдын 29-мартында саат 16:00 дө техника илимдеринин доктору (кандидаты) жана физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алуу боюнча И. Арабаев атындагы Кыргыз мамлекеттик университетинин жана И.Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин Д 05.23.689 диссертациялык кеңешинин отурумунда 770026, Бишкек шаары, Раззаков көч. 51-А, И.Арабаев атындагы КМУнун конференц-залы дареги боюнча өтөт.

Диссертацияны коргоонун онлайн трансляциясынын идентификациялык коду: https://vc.vak.kg/b/d05-xy8-8iw-xsw

Диссертациялык иш менен И.Арабаев атындагы Кыргыз мамлекеттик университетинин (720026, Бишкек ш., Раззаков көчөсү 51-А) жана И.Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университеттин (720044, Бишкек ш., Айтматов проспектиси 66) китепканаларынан жана КР УИАнын сайтында (https://vak.kg) таанышууга болот.

Автореферат 2024-жылдын 28-февралында жөнөтүлдү.

Диссертациялык кеңештин окумуштуу
катчысы, ф.-м.и.к. Асанбекова Н.О.

ИШТИН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ

Теманын актуалдуулугу. Математикалык моделдештирүүнүн тез өнүгүшү, илимий изилдөөлөрдөгү математикалык ыкмалар, илим менен техниканын ар кандай тармактарында татаал маселелерди сандык чечүү ыкмалары бул теманын актуалдуулугун аныктайт жана илимий изилдөөлөрдүн натыйжалуу ыкмалардын бири болуп саналат.

Эсептөө гидродинамикасы, акыркы бир нече ондогон жылдар ичинде тез өнүгүп, анын жардамы менен чече ала турган маселелер жөнөкөй ламинардык агымдардан өтө татаал көп фазалуу агымдарга чейин, анын ичинде жылуулук өткөрүмдүүлүктү камтыйт. Учурдагы программалык эсептөө пакеттеринин көбү долбоорлоо процессин жөнөкөйлөтүү жана арзандатуу үчүн автоматташтырылган долбоорлоо системалары менен байланыштырылган. Эсептөө гидродинамикасы инженердик куралга айланган сайын анын тактыгы маанилүү болуп баратат, бул диссертациянын темасынын актуалдуулугун аныктоочу тактыкты баалоо жана контролдоо үчүн ишенимдүү ыкманын зарылдыгына алып келет.

Математикалык моделдөөнүн ыкмалары жана тигил же бул реалдуу физикалык процесстерди моделдөөнүн тактыгын изилдөө маселелери *[L. F. Richardson The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations with an Application to the Stress in a Masonry Dam. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 210, 307-357], [Н. Н. Яненко Об экономичных неявных схемах (метод дробных шагов) / Н. Н. Яненко // Доклады Академии наук СССР. - 1960. - Т.134, N 5. - С.1034-1036. - Библиогр.: с.1036], [А. А. Самарский Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Вестник АН СССР, 1979, №5, с. 38-49], [Patankar S. V. A Calculation Procedure for Two Dimensional Elliptic Situations. Numerical Heat Transfer. –1981. –Vol. 4. – P. 409–425], [Peric M. A. A Finite Volume Method for the Prediction of Three-dimensional Fluid Flow in Complex Ducts. PhD Thesis. – London: Imperial College, 1985. – 394 p.]* жана башкалардын эмгектеринде каралган.

Диссертациянын темасынын артыкчылыктуу илимий багыттар, ири илимий программалар (долбоорлор) жана илимий изилдөө мекемелери тарабынан жүргүзүлүп жаткан негизги изилдөө иштери менен байланышы. Иштин белгилүү бир бөлүгү 2019-2021-жылга карата, Кыргыз Республикасынын Билим берүү жана илим министрлиги тарабынан каржыланган «Антропогендик мүнөздөгү масштабдуу гидродинамикалык кырсыктардын кесепеттерин математикалык жана компьютердик моделдөө, болжолдоо жана визуализациялоо (Нарын каскадынын дамбаларынын мисалында)» илимий долбоордун алкагында жүргүзүлдү

Изилдөөнүн максаты Кыргызстандын Шамалды-Сай айылына жакын

жердеги Нарын дарыясынын жайылмасында мүмкүн боло турган суу ташкынынын сандык эсептөөлөрүнүн мисалында, кысылбаган суюктуктун жана газдын агымдарынын OpenFOAM7 акысыз колдонмо пакетинин алкагында моделин тандоодо жана аны моделдөө ыкмасын өнүктүрүү.

Коюлган максатка жетүү үчүн төмөнкү маселелер чечилди:

1. Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча Ubuntu 20.04 LTS операциялык системасында орнотулган OpenFOAM7 ачык пакетин текшерүү.

2. Колдонуучунун кийлигишүүсүз жана берилген маселе үчүн оптималдуу торду түзүү аркылуу эң аз эсептөө жүктөмү менен дискреттөө катасын талап кылынган деңгээлден төмөндөтүүгө жөндөмдүү ыкманы түзүү.

3. Шамалды-Сай айылына жакын Нарын дарыясынын жайылмасынын аянтында мүмкүн боло турган суу каптоо көйгөйлөрү үчүн snappyHexMesh аркылуу үч өлчөмдүү эсептөө торчосун түзүү.

4. Кыргызстандагы Шамалды-Сай айылына жакын жерди боло турган суу каптоону сандык моделдөө.

Алынган жыйынтыктардын илимий жаңылыгы:

1. OpenFOAM7 пакетинин текшерүү эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча жүргүзүлдү. Тегерек илиндрдин айланасындагы ламинардык агымда, колдонулган үчүнчү жана экинчи тактыктагы схемалар Струхал саны боюнча 0.172 маанисин берери аныкталды, ошондой эле эксперименталдык жана сандык маалыматтарга 4.2% тактыкта дал келет. Струхал санына боюнча биринчи тартиптеги MinmodV жана upwind схемалары тиешелүү түрдө 8.4% и 14% тактыкта төмөндөтүлгөн маанисин беришет.

2. Кавернасы бар каналдагы агым үчүн контролдук көлөмдүн бетиндеги калдык катаны баалоо ыкмасы иштелип чыкты. Басымдын жана ылдамдыктын чоң градиенттери бар аймактарда торчону ылайыкташтыруунун автоматтык процедурасы бетти чоң ката менен бөлүп турган торчолорду бетке параллел бөлүү жолу менен кайра түзүлөт.

3. Шамалды-Сай айылынын жанындагы Нарын дарыясынын жайылмасынын реалдуу аянтынын жана имараттын моделинин айланасындагы агымдын маселелери үчүн үч өлчөмдүү эсептөөчү торчону автоматтык түрдө түзүү ыкмасы сунушталды. Бул ыкма ушул жерде мүмкүн болгон суу каптоону натыйжалуу сандык моделдештирүүгө, суу каптоонун картасын түзүүгө мүмкүндүк берет.

4. Шамалды-Сай айылына жакын жерде мүмкүн болуучу сел каптоону эсептөө жүргүзүлдү. Суу мамычасынын баштапкы бийиктигинин үч түрдүү H_0 = 5м, 10м жана 15м маанилери үчүн сел каптоо аянты ар кандай мааниге ээ экендиги байкалды – баштапкы бийиктиктин өсүшү менен суу

каптоо аянты аймактын топологиясына жараша көбөйөт.

Алынган жыйынтыктардын практикалык баалуулугу.

Бул иштин жыйынтыктары турбуленттүү агымдарды математикалык моделдөө ыкмаларына белгилүү бир салым кошот. Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча колдонулган OpenFOAM ачык пакетин текшерүү, пакеттин ийне-жибине чейин такталган документтерин түзүүнү өзгөчө белгилеп коюу керек. Аларды жогорку курстун студенттери, магистранттары жана аспиранттары үчүн атайын курс катары окуу процессинде колдонсо болот.

Диссертациянын коргоого алып чыгылган негизги жоболору.

1. Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелеринин алкагында OpenFOAM7 пакетин текшерүүнүн жыйынтыктары.

2. Көңдөйү бар каналдагы агым үчүн коңшу түйүндөрдүн четине экстраполяцияланган маанилерди салыштыруу аркылуу катаны баалоого мүмкүндүк берүүчү контролдук көлөмдүн бетиндеги калдык катаны баалоо ыкмасы. Бул ыкма басымдын жана ылдамдык чоң градиенттери бар аймактарда, чоң ката менен бөлүп турган торчолорду параллелдүү бөлүү жолу аркылуу торду ылайыкташтыруунун автоматтык процедурасын түзүүгө мүмкүндүк берет.

3. Шамалды-Сай айылынын жанындагы аймактын жана имараттын моделинин айланасындагы агымдын маселелери үчүн үч өлчөмдүү эсептөөчү торду автоматтык түрдө куруу ыкмасы.

4. Кыргызстандагы Шамалды-Сай айылында болушу мүмкүн болгон селди моделдоонун жыйынтыгы

Изденүүчүнүн жеке салымы. Диссертация автор тарабынан жүргүзүлгөн өз алдынча изилдөөнүн жыйынтыгы болуп саналат. Автордун жеке салымы маселени коюуда жана анын максатын аныктоодо, максатка жетүү ыкмаларын тандоодо, изилдөө жүргүзүүдө, алынган жыйынтыктарды талдоо жана корутундуларды түзүүдө, макалаларды жарыялоодо турат.

Изилдөөнүн жыйынтыктарын апробациялоо. Бул диссертациялык ишти аткарууда алынган жыйынтыктар төмөнкү эл аралык, республикалык конференцияларда жана семинарларда баяндалган:

– Материал таануу, механикалык жана автоматташтыруу инженериясындагы алдыңкы технологиялар боюнча III- эл аралык конференция: MIP: Engineering-III – 2021. MS ID: AIPCP21-AR-MIP2021-00309. 29-30-апрель, 2021-жыл, Красноярск, Россия.

– Табигый жана прикладдык илимдердеги жетишкендиктер боюнча 5-эл аралык конференция- ICANAS-2021, Ибрагим Чечен университети, Түркия, Агри, 21-23-сентябрь, 2021-жыл.

- «Илимдеги жана тоо-кен, техникалык билим берүүдөгү маалыматтык

технологиялар жана математикалык моделдөө» атындагы Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги, физика-математика илимдеринин доктору, академик Жайнаков Аманбектин 80 жылдыгына арналган эл аралык илимий конференциясы. Академик У.Асаналиев атындагы Кыргыз мамлекеттик геология, тоо-кен жана жаратылыш ресурстарын өнүктүрүү университети, Кыргызстан, Бишкек, 06-08-октябрь, 2021-ж.

– «Илимий, техникалык жана билим берүү мейкиндигинде маалыматтык технологиялар» эл аралык илимий-практикалык конференция, Н.Исанов атындагы Кыргыз мамлекеттик курулуш, транспорт жана архитектура университети, Кыргызстан, Бишкек, 29-октябрь, 2021-жыл.

– И.Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин 65 жылдыгына арналган, «Илимий-техникалык жана билим берүү мейкиндигиндеги интеграциялык процесстер» аттуу эл аралык илимий-техникалык конференция. Бишкек, 18-19-сентябрь, 2019-жыл.

– XV Эл аралык Азия семинар мектеби "Татаал системаларды оптималдаштыруу маселелери". АКК SB Эсептөөчү математика жана математикалык геофизика институту (Россия, Новосибирск), Новосибирск мамлекеттик университети (Россия, Новосибирск), Казакстан Республикасынын Билим берүү жана илим министрлигинин Маалыматтык жана эсептөө технологиялары институту (Казакстан Республикасы, Алматы) менен (Россия, Новосибирск), Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Математика институту (Кыргызстан, Бишкек). Академгородок, Новосибирск, Россия, 26-30-август, 2019-жыл.

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

– XIV Эл аралык Азия семинар мектеби "Татаал системаларды оптималдаштыруу маселелери". Казакстан Республикасынын Билим берүү жана илим министрлигинин Маалымат жана эсептөө технологиялары институту (Казакстан Республикасы, Алматы шаары), Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Математика институту (Кыргыз Республикасы), Бишкек шаары), пансионаты "Hotel Eurasia", Ысык-Көл, Кыргыз Республикасы, 20-июль - 31-июль 2018-ж.

Диссертациянын жыйынтыктарынын басылмаларда чагылдырылышынын толуктугу.

Изилдөөнүн негизги жыйынтыктары 16 илимий макалада жана 6 автордук күбөлүктө, анын ичинде Скопус (3), РИНЦ (2) маалымат базаларына кирген Кыргыз Республикасынан тышкары илимий журналдарда басылып чыккан.

Диссертациянын түзүлүшү жана көлөмү. Диссертация киришүүдөн, 3 баптан, корутундудан, библиографиядан турат. Эмгек 148 барак текстти, 46 сүрөттү, 4 таблицаны жана 118 библиографиялык шилтемелерди камтыйт.

ДИССЕРТАЦИЯНЫН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ

Киришүүдө теманын актуалдуулугу негизделип, изилденип жаткан маселенин коюлушу, изилдөөнүн максаттары жана милдеттери формулировкаланып, эмгектин илимий жаңылыгы жана практикалык мааниси көрсөтүлдү. Диссертациянын түзүлүшү жана негизги мазмууну, бөлүмдөр боюнча кыскача баяндалды.

Биринчи бапта «Адабияттарды изилдөө» диссертациялык иштин темасы боюнча адабияттарга обзор жүргүзүлдү. Фазалардын ортосундагы эркин бетти аныктоо менен турбуленттүү эки фазалуу агымдарды моделдөө ыкмалары каралды.

Биринчи бап боюнча жыйынтыктар: Адабияттарга сереп салуу көрсөткөндөй, турбуленттүүлүктүн эки дифференциалдык теңдемелүү моделдери турбуленттүүлүктү моделдөөнүн дифференциалдык моделдеринин эң өкүлчүлүктүү тобу болуп саналат. Алар Рейнольдстун чыңалуулары турбуленттик илешкектүүлүк коэффициентине жана деформация ылдамдыгынын тензоруна пропорционалдуу болгон Буссинеск гипотезасын колдонууга негизделген.

Экинчи бапта «Методология жана изилдөө ыкмалары» жалпыланган өзгөрмөнүн ϕ транспорттук теңдемесин контролдук көлөм ыкмасы менен дискреттөө ыкмалары каралган.

Навье-Стокстун стационардык жана стационардык эмес теңдемелеринин OpenFOAM7 пакетиндеги сандык чечими **изилдөөнүн обьектиси** болуп саналат.

OpenFOAM7 пакетинин контролдук көлөмдөр ыкмасын колдонуу менен Навье-Стокс теңдемелерин дискретизациялоо ыкмалары **изилдөө предмети** болуп саналат.

Суюктуктун механикасынын негизги теңдемелери Навье-Стокс теңдемелери деп аталган жекече туундулары бар дифференциалдык теңдемелердин системасы болуп саналат [Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., 1986, Лоицянский Л.Г., 2003]:

Үзгүлтүксүздүктүн теңдемеси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Импульстун таралуу тендемеси

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

мында $\rho -$ суюктуктун тыгыздыгы, $U_i, g_i -$ылдамдык векторунун жана

оордук күчүнүн ылдамдануусунун x_i-координатасы боюнча компоненттери, σ_{ij} – илешидүүлүктүн чыңалуу тензору.

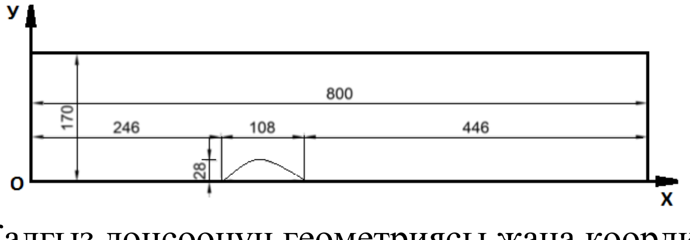
Бул теңдемени контролдук көлөм ыкмасы менен дискреттөө ар бир мүчө үчүн өзүнчө аткарылып, натыйжада дискреттөө каталары аныкталат.

OpenFOAM7 ачык пакетинин алкагында Навье-Стокстун теңдемелерин чечүүнүн жалпы алгоритми да берилген.

Экинчи бап боюнча жыйынтыктар: Кысылбаган суюктук жана газ агымдары үчүн негизги тендемелердин ар бир мүчөсүн дискреттөө ыкмалары иреттүү каралган. Сызыктуу эмес мүчөлөрүн сызыктуу түргө келтирүү ыкмалары келтирилген. Басым аркылуу байланышкан сызыктуу эмес тендемелерди сандык чечүү үчүн SIMPLE жана PISO ыкмалары каралды. Эсептөө гидродинамикасынын колдонмо программаларынын заманбап топтомдору жөнүндө маалымат берилди, колдонулган топтомдун түзүлүшү каралды, Пре-процессингдин жана пост-процессингдин ыкмалары келтирилген.

Үчүнчү бап «Ламинардык жана турбуленттүү агымдардын сандык моделдөө» OpenFOAM программалык пакетинин алкагында ламинардык жана турбуленттүү агымдардын динамикасын сүрөттөгөн стационардык эмес үч өлчөмдүү Навье-Стокс теңдемелеринин негизинде татаал гидродинамикалык кубулуштарды математикалык моделдөөнүн жыйынтыктары берилген.

Биринчи тесттик маселе. Дөңсөнүн айланасындагы агым. Бул маселенин максаты – тегиз эмес рельефтеги тоскоолдуктун айланасында суунун агымы учурунда OpenFOAM7де камтылган турбуленттүүлүктүн моделдеринин көйгөйлөрүн текшерүү. Биринчи маселенин геометриясы 3.1-сүрөттө көрсөтүлгөн. Суу каналга сол жактан агып кирип, оң жагынан чыгып, [Almeida G. P., D. F. G. Durao and M. V. Heitor, 1993] эксперименталдык ишке туура келет. Каналдын бийиктиги H = 170 мм, ал эми дөңсөнүн максималдуу бийиктиги h = 28 мм жана узундугу 2R = 108 мм болгон. Жумушчу суюктук катары кинематикалык илешимдүлүүгү ν = 1×10^{-6} $м^2/с$ болгон суу эсептелинет. Орточо ылдамдык U_0=2.147 м/с жана h боюнча эсептелген Рейнольдос саны $Re = \frac{U_0 h}{\nu} = $ =60 116га барабар.



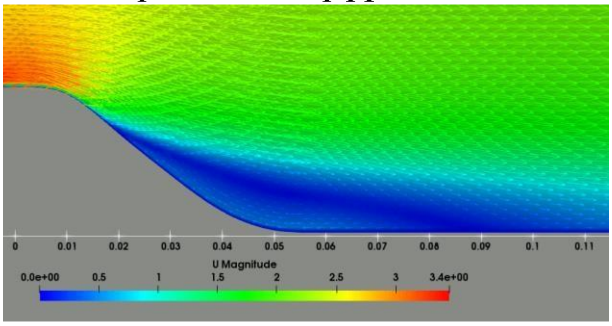
3.1-сүрөт. Жалгыз дөңсөөнүн геометриясы жана координата октору

Колдонулган турбуленттүүлүктүн моделдеринин параметрлери 3.1-таблицада келтирилген.

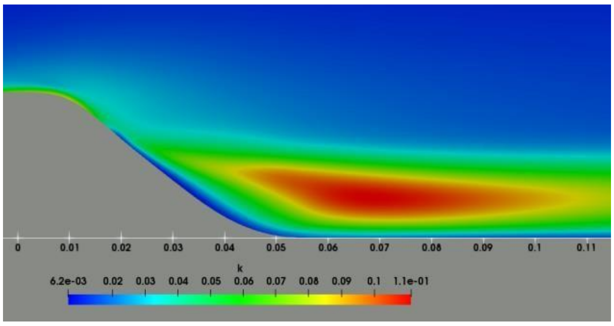
Таблица 3.1 - Турбуленттүүлүктүн k-ε-моделинин коэффициенттери

k-ε модели		C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1	Стандарт	0.09	1.44	1.9	1.0	1.3
2	Ишке ашырылуусу	0.09	1.44	1.9	1.0	1.2
3	RNG	0.033	1.176	1.92	1.0	1.3
4	Монин-Обухов	0.033	1.176	1.92	1.0	1.3
5	Атмосфералык чек ара катмары	0.0256	1.13	1.9	0,74	1.3

3.2-сүрөттө ылдамдык модулунун талаасы жана 3.3-сүрөттө стандарттык k-ε турбуленттүүлүк модели үчүн турбуленттик кинетикалык энергия көрсөтүлгөн. Дөңсөөнүн алдынан агым басаңдап, анын чокусуна жакындаган сайын ылдамдыгы жогорулап, дөңсөөнүн артында рециркуляция зонасы бар экенин көрүүгө болот.

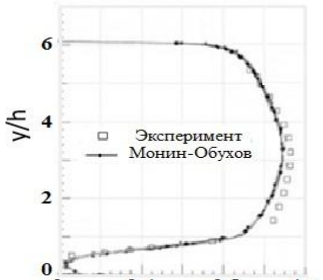


3.2-сүрөт. Ылдамдыктын дөңсөөнүн аркасындагы талаасы

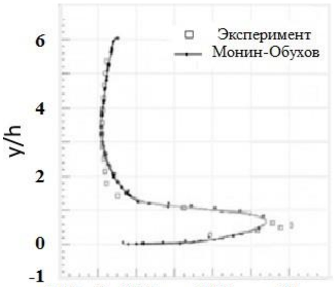


3.3-сүрөт. Турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясынын дөңсөөнүн аркасындагы талаасы

Төмөнкү сүрөттөрдө узатасынын болгон ылдамдыктын (3.4-сүрөт) жана турбуленттиктин кинетикалык энергиясынын (3.5-сүрөт) x = 90 мм кесилишиндеги сандык маанилери тиешелүү эксперименттик маалыматтар менен салыштыруу келтирилген.



3.4-сүрөт. Узатасынын болгон ылдамдыктын профили

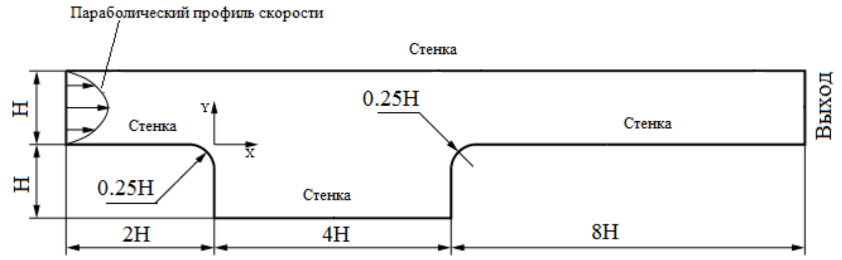


3.5-сүрөт. Турбуленттүүлүктүн энергиясынын профили

Узутасынан болгон ылдамдык U_0 бирдиктеринде көрсөтүлөт, турбуленттүүлүктүн кинетикалык энергиясы U_0^2, маанисине, туурасынан кеткен координата h маанисине бөлүнгөн. 3.4 жана 3.5-сүрөттөрдөн эксперименталдык маалыматтар менен Монин-Обухов моделинин эң жакшы

дал келүүсү көрүнүп турат.

Экинчи тесттик маселе. Көңдөйлүү каналдагы агым. Бул тесттик маселеде четтери тегеректелген каналдагы эки өлчөмдүү ламинардуу агымды, каналдын төмөнкү дубалында жайгашкан көңдөйдү карайбыз (3.6-сүрөттү караңыз).

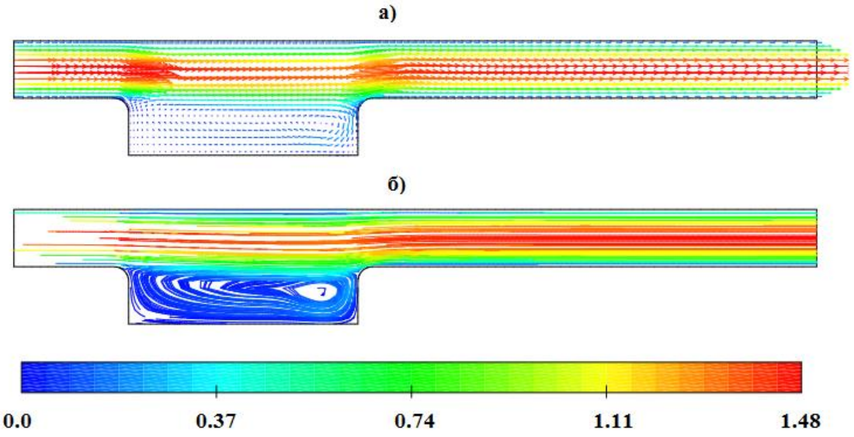


3.6-сүрөт. Маселенин геометриясы, координаталар системасы жана чек ара шарттары

Бул маселени тандоонун максаты эсептөө торчосун майдалоонун адаптивдик ыкмасын изилдөө болуп саналат. Бул учурда контролдук көлөмдүн каптал бетиндеги катаны баалоо үчүн биз киргизген ыкма колдонулат.

3257 ячейкадан турган акыркы эсептөө торчодо алынган сандык жыйынтыктар 3.8аб-сүрөттө көрсөтүлгөн. Ылдамдык модулунун максималдуу мааниси 1.48м/с. Ылдамдык кирүү ылдамдыгынын орточо маанисине бөлүнгөн.

3.8а-сүрөттөн көрүнүп тургандай, негизги агым Ох огу боюнча багытталган жана Оу огу боюнча ылдамдыктын өзгөрүшү параболикалык закону боюнча жүрөт. Көңдөйдүн оң жогорку бурчунун жанында акырындоо чекити пайда болуп, анда ылдамдыктын жана басымдын чоң градиенттери пайда болот.



3.8-сүрөт. Ылдамдык векторунун талаасы (а) жана модулунун изолиниялары (б)

Көңдөйдүн өзүндө куюн пайда болот, ал каналдагы негизги агымга параллель кыймылдап, акрындоо чекитинен кийин ылдыйга кетет. Андан ары көңдөйдүн төмөнкү чекитине жеткенде солго бурулуп, негизги агымга каршы чыгат. Бул куюн көңдөйдүн сол дубалына жетип, андан ары оң дубалга

көтөрүлүп, сол жогорку бурчка жакын жердеги негизги агымга кошулат. Көңдөйдүн сол жогорку бурчуна жакын бул аймакта ылдамдык жана басым градиенттери көңдөйдүн оң жогорку бурчуна караганда азыраак болушат.

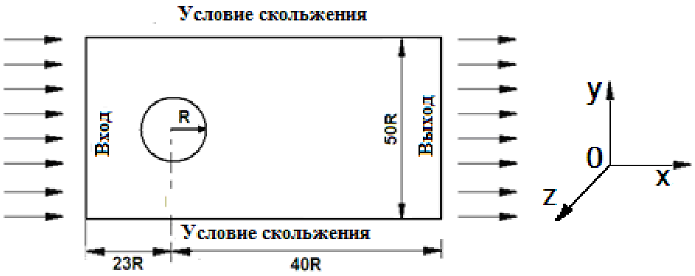
3.2-таблицада, эсептөө тордун туруктуу майдаланышы үчүн да, адаптивдүү тор үчүн да басымдын жоготуу коэффициенти жөнүндө маалымат берилген.

Таблица 3.2 - Басымдын жоготуу коэффициенти

Адаптивдүү коюулуу		Туруктуу кадам менен майдалоо	
Ячейкалардын саны	C_p	Ячейкалардын саны	C_p
36	1.241	172	1.438
144	1.351	1548	1.502
496	1.468	13932	1.518
1541	1.508	125388	1.52
2734	1.518	501552	1.52
3044	1.518		
3227	1.518		
3457	1.518		

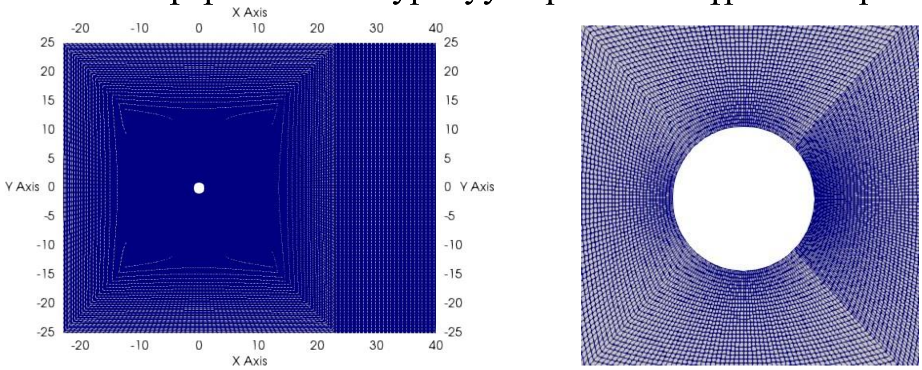
3.2-таблицадан көрүнүп тургандай, эсептөө торчосун адаптивдик ыкманын жардамында майдалоодо басымдын төмөндөшү өзүнүн акыркы маанисине тез жетет. Басымдын жоготуу коэффициенти майдалоонун акыркы төрт циклинде өзгөрбөйт, бул талап кылынгандан жогору болжолдонгон катасы бар калган беттер басым талаасынын глобалдык тактыгына таасир этпейт деп болжолдоого мүмкүндүк берет. Акыркы ылайыкташтырылган сторчодогу басымдын төмөндөшү баштапкы басымдын төмөндөшү менен жакшы шайкеш келет (0.2% каталык). Бул адаптивдүү майдалоо эсептөө торчосунун клеткаларынын санын үнөмдөө аркылуу так чечимдерди камсыз кылат дегенди билдирет, анткени ылайыкташтырылган акыркы торчо туруктуу кадам менен майдаланган эсептөө торчонун ячейкаларынын санынын 0.65%ын камтыйт.

Үчүнчү тесттик маселе. Тегерек цилиндрдин айланасындагы ламинардык агым. Бул маселенин максаты, Навье-Стокс теңдемелеринин системасындагы конвективдик мүчөнү дискреттөөнүн ар кандай ыкмаларынын тактыгын изилдөө болуп саналат. Кысылбоочу чөйрөгө жайгашкан радиусу R=1м цилиндрдин айланасындагы солдон оңго карай багытталган 2 өлчөмдүү агым каралат. Келе жаткан агымдын ылдамдыгы 1 м/с. Каралып жаткан маселенин геометриясы жана чек ара шарттары 3.18-сүрөттө көрсөтүлгөн. Координаталардын башталышы цилиндрдин геометриялык борборунда жайгашкан.



3.18-сүрөт. Маселенин геометриясы жана чек ара шарттары.

Моделдоо үчүн OpenFOAM7 пакетинин blockMesh утилитасынын жардамы менен түзүлгөн тик бурчтуу торчо 3.19-сүрөттө көрсөтүлгөн.



3.19-сүрөт. Эсептөө торчосу (солдо) жана цилиндрдин жанындагы торчо(оңдо)

(1) теңдемелер системасы үчүн дискреттөө ыкмалары жөнүндө маалымат 3.3-таблицада келтирилген.

Таблица 3.3 - Колдонулган дискреттештирүү схемалары

Мүчө	Схема	Схеманын тактык тартиби
Убакыт боюнча туундусу	CrankNicolson 0.5	Биринчи экинчи
Градиент	Gauss linear	Экинчи
Конвекция	Upwind, MinmodV GammaV 1.0, vanLeerV limitedLinearV 1 linearUpwindlimitedV SuperBeeV,QUICKV	Биринчи Экинчи Экинчи Экинчи Экинчи/Үчүнчү
Диффузия	Gauss linear corrected	Экинчи
Интерполяция	Linear	Экинчи

(1) теңдемедеги конвективдик мүчөсү үчүн колдонулган бардык дискреттөө схемаларынын сандык натыйжалары боюнча маалыматтар 3.4-таблицада көрсөтүлгөн. t=500s убакытка чейинки эсептөө убактысы боюнча эң үнөмдүү схема upwind болуп чыкты, ал эми GammaV 1.0 схемасын колдонгон учурда эсептөө убактысы максималдуу болгон, болжол менен 1713.18 с.

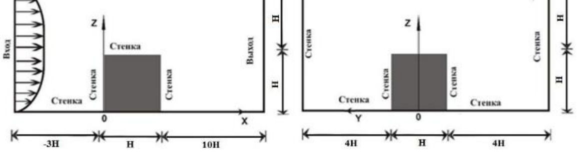
Таблица 3.4 – Сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктары

Схема	Gamma V 1.0	Limited LinearV 1	Linear Upwind limited	QUICK V	van LeerV	Super BeeV	Minmod V	upwind
Эсептоо убактысы	1713.1	1015.18	1097.75	1030.96	1501.34	1024.84	1404.5	858.82
Струхаль саны	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.156	0.141
жыштык Гц	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.078	0.070

Экинчи тартиптеги тактыкка ээ болгон бардык колдонулган схемалар үчүн Струхаль саны 0.172 ге барабар болду. Бул жыйынтык 4.2% тактык менен тиешелүү түрдө алынган эксперименталдык (0.164) [Tritton, D.J. 1959г.] жана сандык (0.165) [Qu, L., Norberg, C., Davidson, L., Peng, S., Wang, F 2013г.] маанилерге туура келет. MinmodV схемасы Струхаль санынын 8.4%, ал эми upwind схемасы анын 14% аз болгон маанилерин берет. upwind схемасынын мындай жүрүм-туруму, кыязы, сандык диффузияга байланыштуу [Ferziger JH, Peric M. 2002] болот.

Төртүнчү тесттик маселе. Курулуш моделинин - кубтун айланасындагы агым. Тесттик тапшырма катары тик бурчтуу кесилиши бар үч өлчөмдүү эародинамикалык трубанын борборунда жайгашкан кубдун айланасындагы агымды моделдөө менен байланышкан. Маселе ERCOFTAC маалымат базасынан алынган, 41-учур жана эксперименталдык [Martinuzzi, Tropea, 1993] ишке туура келет. 390×60×5 см өлчөмүндөгү каналдын төмөнкү дубалынын ортосуна орнотулган куб имараттын үлгүсү болуп саналат. Сызыктуу өлчөмү H = 2.5 см болгон куб каналдын киришинен төмөнкү 3H аралыкта жайгашкан. Кубдун бийиктиги аркылуу эсептелген Рейнольдс саны 80000 барабар. Кабыл алынган координаттар системасы жана чек ара шарттары 3.31-сүрөттө көрсөтүлгөн. Координаталардын башталышы кубдун шамал соккон тараптагы бетинин ылдыйкы кырында жайгашкан.

Бул тапшырманын максаты OpenFOAM7 пакетинин snappyHexMesh утилитасын колдонуу менен үч өлчөмдүү эсептөө торчону куруунун автоматтык ыкмасын сыноо. Андан кийин, эсептөөчү торчосун куруунун бул ыкмасы Нарын дарыясынын Шамалды-Сайга жакын жайылмасында суу ташкындоо процессин моделдөө боюнча маселеде колдонулат.



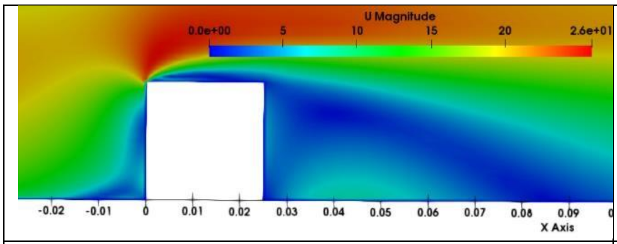
3.31-сүрөт. Маселенин геометриясы жана чек ара шарттары

Кыскача айтканда, эсептөө торчосун түзүү төмөнкүдөй жүргүзүлөт. Адегенде ASCII формасында stl форматында кубдун бетин камтыган файлды даярдап, аны /constant/triSurface папкасына жайгаштыруу керек. Андан кийин, C++ тилиндеги snappyHexMeshDict программасында даярдалып, ал system папкасына жайгаштырылат.

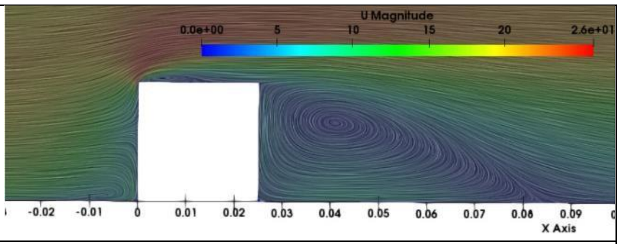
Андан кийин, blockMesh утилитасынын жардамы менен түзүлгөн алты беттүү фондук торчо OpenFOAM7нин snappyHexMesh утилитасынын жардамынды snappyHexMeshDict программасынын негизде үч өлчөмдүү эсептөө торчосуна айландырылат. Кубдун жанындагы эсептөө торчосун майдалоо 3.32-сүрөттө көрсөтүлгөн.

3. 32-сүрөт. Бир тектүү алгачкы тор (солдо)
жана такталган акыркы тор (оңдо)

Ылдамдык талаасы 3.33-сүрөттө, ал эми 3.34-сүрөттө ылдамдык модулунун изолиниялары көрсөтүлгөн, мында рециркуляция зоналары кубдун алдында (шамал тарапта) кубдун үстүндө жана кубдун артында (теңке тарап) даана көрүнүп турат.

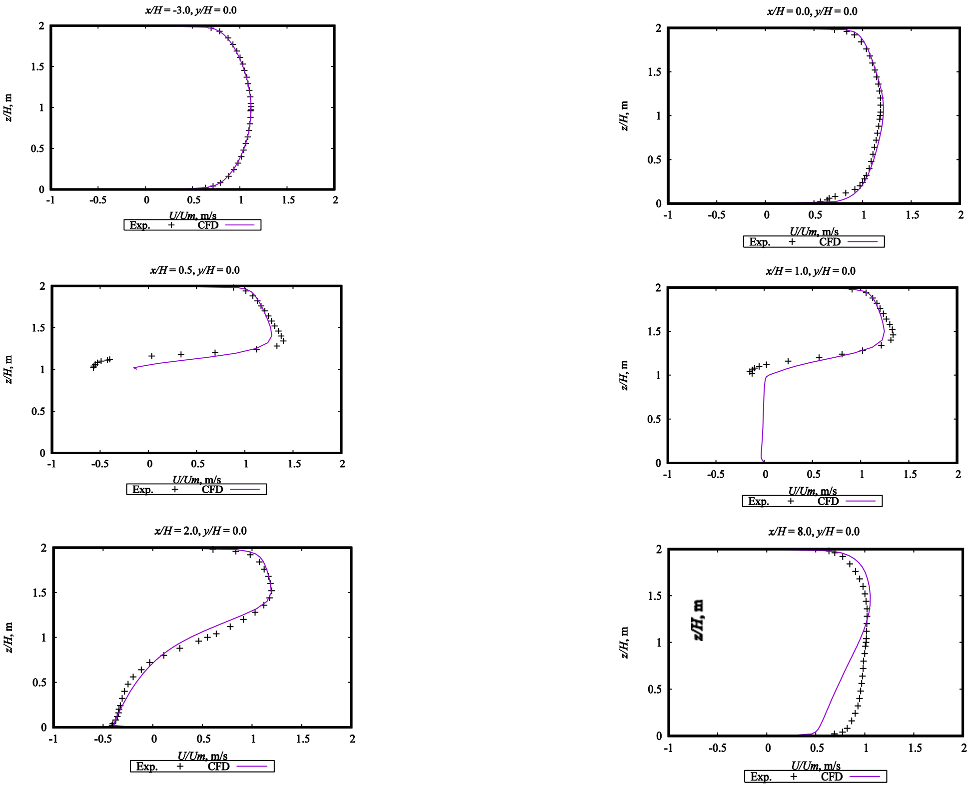


3.33-сүрөт. Ылдамдык модулунун талаасы



3.34-сүрөт. Ылдамдык модулунун изолиниялары

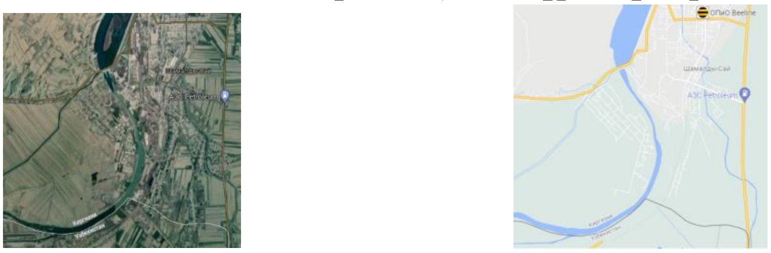
Узатасынан кеткен Ux ылдамдыктын сандык натыйжалары (түз сызык) эксперименттик маалыматтар (маркерлер) менен салыштыруу 3.35-сүрөттө көрсөтүлгөн. Сандык маалыматтар менен эксперименттин ортосундагы дал келүүчүлүк канааттандырарлык деп табылышы керек. Бул структураланбаган эсептөө торчосун куруу ыкмасынын адекваттуулугун көрсөтүп турат.



3.35-сүрөт. Узатасынан кеткен ылдамдыктын туурасынан кеткен профилдери

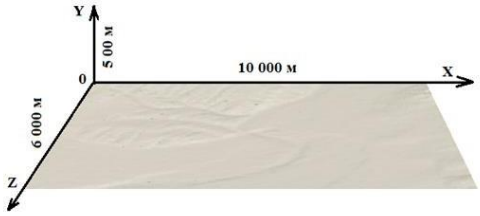
Бешинчи тесттик маселе. Шамалды-Сай айылына жакын Нарын дарыясынын жайылмасында суу ташкынынын сандык моделдөө.

Шамалды-Сайга жакын жердеги Нарын дарыясынын жайылмасында мүмкүн болгон сел маселеси каралат (3.36-сүрөттү караңыз).



3.36-сүрөт. Рельефтин спутниктик сүрөтү (солдо) жана аймактын картасы (оңдо)

Торчо АКШнын Геология кызматынын DEM маалыматтарынын негизинде курулуп, кийин стереографикалык stl форматында ASII тексттик файлына айландырылат. OpenFOAM7 пакетинин snappyHexMesh утилитасы 3D торчону түзүү үчүн колдонулат. Шаар тибиндеги Шамалды-Сай конушунун жанындагы Нарын дарыясынын жайылмасынын 10 000 м×6 000 м×500 м өлчөмүндө ушундай жол менен түзүлгөн үч өлчөмдүү эсептөө торчосу 3.37-сүрөттө көрсөтүлгөн. Эсептөө торчосу 1 387 149 гексаэдрден, 151 призмадан жана 187 470 полиэдирден турат жана жалпы контролдук көлөмдөрдүн саны 1 574 770.



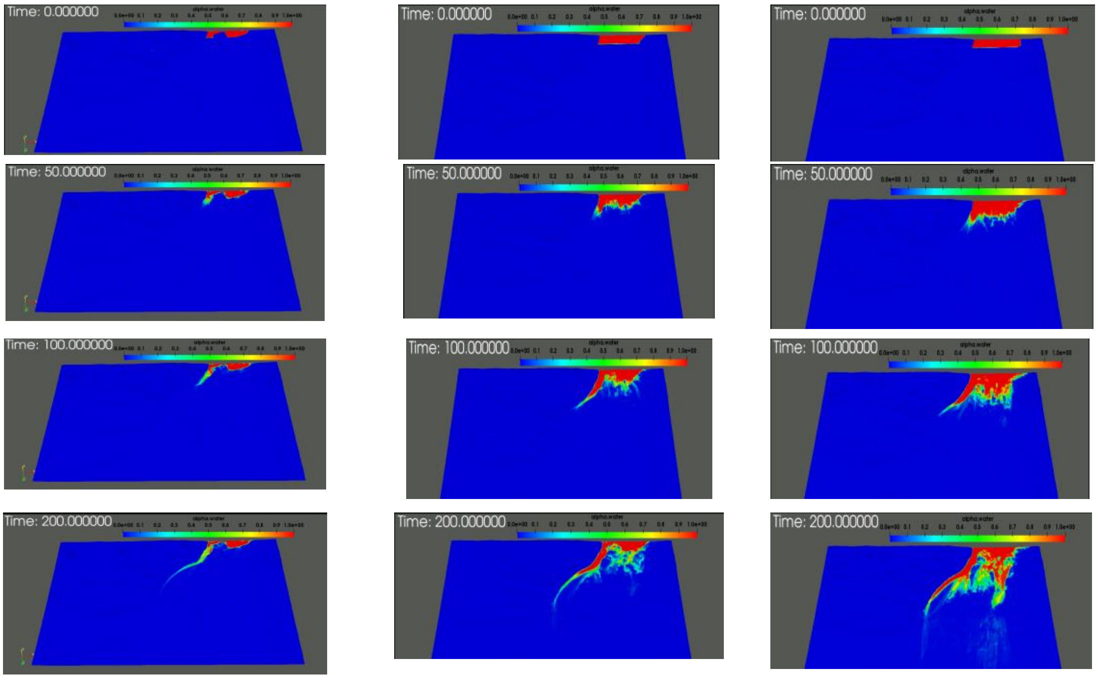
3.37-сүрөт. Нарын дарыясынын жайылмасынын үч өлчөмдүү эсептөө торчосу

Жыштыгы 1.60 ГГц болгон Intel ® Core i5-8250U процессору жана орнотулган оперативдүү эс тутуму 8 ГБ болгон компьютерде жалпы эсептөө убактысы 183 373 сек, же болжол менен 51 саатты түзгөн. Вертикалдык координата огу Нарын дарыясынын нугунун түбүнөн өлчөнөт.

Убакыттын ар кандай моменттеринде суунун көлөмдүк үлүшүнүн бөлүштүрүлүшү төмөнкү 3.38-сүрөттө көрсөтүлгөн. Эсептөөлөр суу мамысынын баштапкы бийиктигини үч түрдүү H_0= 5м, 10м жана 15м болгон маанилери үчүн жүргүзүлгөн. Мындан баштапкы маани канчалык жогору болсо, ошончолук көп аянтты сел толкуну каптаганын көрүүгө болот.

Болжол менен 300с же 5 мүнөттө сел толкунунун алдыңкы бөлүгү Нарын дарыясынын нугу боюнча төмөн көздөй 6000 м аралыкты басып өтөт (3.38в-сүрөттү караңыз). Мында суунун агымынын, дарыянын нугундагы өсүмдүктөр жана ар кандай имараттар менен өз ара аракети эске алынбайт, бул агымдын жалпы схемасын байкаларлык түрдө өзгөртүп, сел каптоо зонасын көбөйтүүгө алып келет.

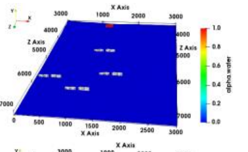
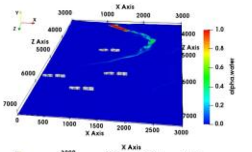
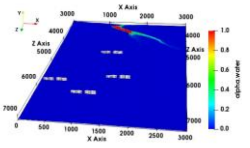
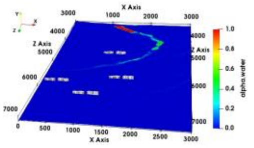
а) H_0= 5м б) H_0= 10м в) H_0= 15м



3.38-сүрөт. Суу мамычасынын ар кандай маанилери үчүн сел каптоо толкунун озгөрүшү

Кийинки иште биз сегиз үйдүн макеттери менен толукталган бул аймактагы суу каптоо окуясын карап көрөлү.

Мында эсептөөчү уячалардын жалпы саны 2 062 935, анын ичинен 1 786 565 гексаэдр, 11 819 призмалар, 262 740 көп жүздүү жана 1 811 тетраэдр. 1,60 ГГц жыштыгы жана 8 ГБ оперативдик эс тутуму орнотулган Intel ® Core i5-8250U процессору бар компьютерде эсептөөнүн жалпы убактысы 369 628 с, же болжол менен 103 саатты түздү.

t, c	alpha.water	t, c	alpha.water
0		250	
100		300	

3.40 -сүрөт. Суу мамычасынын баштапкы бийиктиги H=15м үчүн жарылуучу толкундун эволюциясы.

Эсептөө убактысын үнөмдөө максатында эсептөө домениних өлчөмү биринчи учурга салыштырмалуу болжол менен 3 эсеге кыскарып, 3000м×7000м×500мге барабар болгон.

Бул жерде өзгөчө белгилей кетүүчү нерсе, компьютердин эсептөө мүмкүнчүлүктөрү чектелүү болгондуктан, эсептөө торчосунун өлчөмү салыштырмалуу чоң болуп тандалган. Демек, алынган эсептөө жыйынтыктары баалоочу катары кабыл алынып, жогорку өндүрүмдүүлүктөгү эсептөө системаларын колдонуу менен майда торчодо текшерүүнү талап кылат.

Үчүнчү бап боюнча жыйынтыктар: Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча тандалган OpenFOAM7 пакетин текшерүү жүргүзүүгө мүмкүндүк берген бир нече тест маселелери каралды. Диссертациялык иштин максатына жетүү үчүн түзүлгөн бардык 4 маселе каралды жана чечилди.

КОРУТУНДУ

Диссертациялык иштин негизги жыйынтыктары жана корутундулары төмөнкүлөр:

1. OpenFOAM7 пакетин текшерүү эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча жүргүзүлгөн. Тегерек цилиндрдин айланасында ламинардык агым учурда, экинчи жана үчүнчү тартиптеги тактыкта колдонулган схемалары Струхаль саны боюнча 0.172 маанисин берери

аныкталды, бул эксперименталдык жана сандык маалыматтар менен 4.2% тактыкта дал келет. Биринчи тартиптеги тактыктагы MinmodV жана upwind схемалары Струхаль санынын, тиешелүү түрдө, 8.4%, 14% га төмөндөтүлгөн маанилерин беришет.

2. Көңдөйү бар каналдагы агым үчүн коңшу түйүндөрдүн четине экстраполяцияланган маанилерди салыштыруу аркылуу катаны баалоого мүмкүндүк берүүчү контролдук көлөмдүн бетиндеги калдык катаны баалоо ыкмасы иштелип чыккан. Басымдын жана ылдамдык чоң градиенттери бар аймактарда, чоң ката менен бөлүп турган торчолорду параллелдүү бөлүү жолу аркылуу торду ылайыкташтыруунун автоматтык процедурасы түзүлдү.

3. Шамалды-Сай айылынын жанындагы Нарын дарыясынын жайылмасында жана имараттын моделинин айланасындагы агымдын маселелери үчүн үч өлчөмдүү эсептөөчү торчону автоматтык түрдө куруу ыкмасы сунушталды. Бул ыкма ушул жерде мүмкүн болгон суу каптоону натыйжалуу сандык моделдештирүүгө, суу каптоонун картасын түзүүгө мүмкүндүк берет.

4. Кыргызстандагы Шамалды-Сай айылына жакын жерде болушу мүмкүн болгон селди эсептөө жүргүзүлдү. Суу мамычасынын баштапкы бийиктигинин үч түрдүү маанилери $H_0 = 5$м, 10м жана 15м үчүн сел аянты ар кандай мааниге ээ экени аныкталды - баштапкы бийиктиктин өсүшү менен аймактын топологиясына жараша суу каптоо аянты көбөйөт.

ДИССЕРТАЦИЯНЫН ТЕМАСЫ БОЮНЧА ЖАРЫЯЛАНГАН ИШТЕРДИН ТИЗМЕСИ

1. **Акназарова, С. С.** Моделирование турбулентного обтекания куба методом крупных вихрей [Текст] / С. С. Акназарова, А. К. Калеева, А. Т. Калмурзаева. //Известия Ошского технологического университета 2018. №1-1. ст.102-108. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=37351800

2. **Жайнаков, А. Ж.** Моделирование трёхмерного нестационарного течения в каверне [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Г. Т. Сулайманова. // В сборнике: Проблема «Оптимизации сложных систем».Материалы Международной школы –семинар.2018 г. ст.214-219. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37014647

3. Жайнаков, А. Ж. Моделирование трехмерного турбулентного течения методом крупных вихрей. [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, С. С. Акназарова, А. Т. Калмурзаева. // Известия Кыргызский государственный технический университет им. И. Разаков. 2019г. №2-1(50) ст. 344-349. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39537361

4. Жайнаков, А. Ж. Алгоритм моделирования обтекания двумерных

отрывных течений в пакете OPENFOAM. [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, А. Б. Турганбаева. //Известия Кыргызский государственный технический университет им. И. Разаков. 2019г. №2-1(50) ст. 340-344. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39537360

5. Калмурзаева, А. Т. Моделирование турбулентного течения методом больших вихрей в пакете OPENFOAM. [Текст]/ А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, С. С. Мамаев, С. С. Акназарова. //Проблема «Оптимизации сложных систем». Материалы Международной школы –семинар. 2019г.ст. 46-51, Новосибирск, Россия. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=41540168,

6. Курбаналиев, А. Ы. Программа для моделирования ламинарного течения в двумерной квадратной каверне с подвижной верхней крышкой в пакете *Matlab.* [Текст]/ А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева. //Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 14.02.2020г. №604. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://drive.google.com/file/d/1n4sfxgwpFDCSbVktchBdghTaZolPfcvs/view

7. Курбаналиев, А. Ы. Программа для моделирования течения в двумерной каверне на основе проекционного метода. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М.Ж.Калбекова. Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 08.10. 2020г. №639. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2023/06/%D0%98%D0%9C-11-2020.pdf

8. Курбаналиев, А. Ы. Критическое сравнение различных версий пакета OPENFOAM на задаче моделирования водослива. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, Б. Р. Ойчуева, А. Т. Калмурзаева, А. Ж. Жайнаков, Т. Ч. Култаев.// Вычислительные технологии. ISSN 1560-7534.Том 26 №1. Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий. 2021г. Т.26, стр.44-57. Новосибирск, Россия. Doi 10.257433/ICT.2021.26.2.004 – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45668393

9. Курбаналиев, А. Ы. Программа для численного решения уравнений Навье-Стокса в двумерном приближении. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова, Марс кызы Таттыбубу.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2021г., №672, 25.02.2021. http://old2.patent.kg/wp-content/uploads/2021/04/%D0%98%D0%9C-41-2021.pdf

10. Калмурзаева, А. Т. Численное моделирование нестационарного обтекания кругового цилиндра. [Текст] / А. Т. Калмурзаева, З. К. Абдумиталипова, А. Ы. Курбаналиев, Марс кызы Таттыбубу. // Вестник Ошского государственного университета. ISSN 1694-7452. 2021, Том 1. №1 Ст.144-150. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561758

11. Калбекова, М. Ж. Мультифизическое моделирование процесса теплопроводности [Текст] / М. Ж. Калбекова, Марс кызы Таттыбубу, Ормош кызы А., А. Т. Калмурзаева. //Вестник Ошского государственного университета. ISSN 1694-7452. 2021. Том 1 №1 Ст. 136-143. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561757

12. Калмурзаева, А. Т. Программа для решения задачи численного моделирования течения квадратной каверне с использованием гибридной схемы дискретизации с использованием алгоритма SIMPLE. [Текст]/ А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, Марс кызы Таттыбубу// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2021г. №693, 27.03.2021. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://old2.patent.kg/wp-content/uploads/2021/07/%D0%98%D0%9C-622021.pdf

13. Kurbanaliev, A. Y. Turbulent Flow Modelling using open source packages OpenFOAM and Paraview. A. Y. Kurbanaliev, A. T. Kalmurzaeva., B. R. Oichueva, A. B. Turganbaeva.//Proceedings of 5th International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences, 21-23 September 2021, Ağrı, Turkey. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPQSyfHvnCILs2_Mb3048UBu7/view

14. Калмурзаева, А. Т. Численное моделирование течения в каверне при умеренных числах Рейнольдса. [Текст] / А. Т. Калмурзаева // Горный журнал. Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов имени академика У. Асаналиева. Бишкек 2021.стр. 18-22. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ksmu.kg/wp-content/uploads/2021/11/zhurnal-01.10.2021.pdf

15. Курбаналиев, А. Ы. Численное моделирование течения в канале с каверной методом адаптивных сеток. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Марс кызы Таттыбубу. // "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика" № 43(1), 2021 г. Бишкек. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48227013

16. Курбаналиев, А. Ы. Исследование точности аппроксимации временной производной в OpenFOAM. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Марс кызы Таттыбубу.// "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика". № 43(1), 2021 г. Бишкек. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48227009

17. Kurbanaliev, A. Y. Crictical reviewing of OpenFOAM buoyantcavity tutorial. [Текст] / A. Y. Kurbanaliev, M. Zh. Kalvekova, A. T. Kalmurzaeva, T.Dyikanova. // AIP Conference Proceedings 2402, 20009 2021г. DOI 10.1063/5.0071571. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47558659

18. Kurbanaliev, A.Y. Numerical Simulation of Nonstationary Laminar Flow around a Circular Cylinder. [Текст] / A. Y. Kurbanaliev, A. T. Kalmurzaeva, M. Zh. Kalvekova. A. T. Dyikanova, N. A. Amankulova// AIP Conference Proceedings 2402, 2021г. DOI 10.1063/5.0071578. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47557342

19. Калмурзаева ,А.Т, Анализ ошибок вычислений при моделировании плоской струии. [Текст] / А. Т. Калмурзаева., Т.Т.Ташполотов// Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана №5, 2023г. Бишкек То же: [Электронный ресурс]. –Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=54791066

20. Курбаналиев, А. Ы. Численное моделирование наводнения в пойме реки нарын вблизи городка Шамалды-Сай [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева.// "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика". №52(2), 2023 г. Бишкек. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=55163157

21.Курбаналиев, А. Ы. Программа для подготовки данных для моделирования я естественной конвекции в прямоугольной каверне в пакете Open FOAM [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., .№742, 11.04.2022. http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2022/12/%D0%98%D0%9C-7-2022.pdf

22.Калмурзаева, А. Т. Программа для подготовки данных для моделирования я естественной конвекции в прямоугольной каверне в пакете OPEN FOAM [Текст] / А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, Т.Т.Ташполотов.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., .№742, 11.04.2022. http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2022/10/%D0%98%D0%9C-92022.pdf

05.13.16 - илимий изилдөөлөрдө эсептөө техникаларын, математикалык моделдөөнү жана математикалык методдорду колдонуу адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн Калмурзаева Анипа Ташбаевнанын «Контролдук көлөмдөр ыкмасынын эсептөө каталыктарын анализдөө» аттуу темадагы диссертациялык ишинин

РЕЗЮМЕСИ

Ачкыч сөздөр: турбуленттүүлүк, дискретизациялоо, контролдук көлөм ыкмасы, интерполяция ыкмалары, OpenFOAM7.

Изилдөө объектиси. Навье-Стокстун стационардык жана стационардык эмес теңдемелеринин OpenFOAM7 пакетиндеги сандык чечими.

Изилдөөнүн предмети. OpenFOAM7 пакетинин контролдук көлөмдөр ыкмасын колдонуу менен Навье-Стокс теңдемелерин дискретизациялоо ыкмалары.

Изилдөөнүн максаты. Кыргызстандын Шамалды-Сай айылына жакын жердеги Нарын дарыясынын жайылмасында мүмкүн боло турган суу ташкынынын сандык эсептөөлөрүнүн мисалында, кысылбаган суюктуктун жана газдын агымдарынын OpenFOAM7 акысыз колдонмо пакетинин алкагында моделин тандоодо жана аны моделдөө ыкмасын өнүктүүрүү.

Изилдөө ыкмасы. OpenFOAM7 пакетиндеги эсептөө гидродинамикасынын маселелерин математикалык моделдөө.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы:

1. OpenFOAM7 пакетинин текшерүү эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча жүргүзүлдү. Тегерек илиндрдин айланасындагы ламинардык агымда, колдонулган үчүнчү жана экинчи тактыктагы схемалар Струхал саны боюнча 0.172 маанисин берери аныкталды, ошондой эле эксперименталдык жана сандык маалыматтарга 4.2% тактыкта дал келет. Струхал санын боюнча биринчи тартиптеги MinmodV жана upwind схемалары тиешелүү түрдө 8.4% и 14% тактыкта төмөндөтүлгөн маанисин беришет.

2. Кавернасы бар каналдагы агым үчүн контролдук көлөмдүн бетиндеги калдык катаны баалоо ыкмасы иштелип чыкты. Басымдын жана ылдамдыктын чоң градиенттери бар аймактарда торчону ылайыкташтыруунун автоматтык процедурасы бетти чоң ката менен бөлүп турган торчолорду бетке параллел бөлүү жолу менен кайра түзүлөт.

3. Шамалды-Сай айылынын жанындагы Нарын дарыясынын жайылмасынын реалдуу аянтынын жана имараттын моделинин айланасындагы агымдын маселелери үчүн үч өлчөмдүү эсептөөчү торчону автоматтык түрдө түзүү ыкмасы сунушталды. Бул ыкма ушул жерде мүмкүн болгон суу каптоону натыйжалуу сандык моделдештирүүгө, суу каптоонун картасын түзүүгө мүмкүндүк берет.

4. Шамалды-Сай айылына жакын жерде мүмкүн болуучу сел каптоону эсептөө жүргүзүлдү. Суу мамычасынын баштапкы бийиктигинин үч түрдүү H_0 = 5м, 10м жана 15м маанилери үчүн сел каптоо аянты ар кандай мааниге ээ экендиги байкалды – баштапкы бийиктиктин өсүшү менен суу каптоо аянты аймактын топологиясына жараша көбөйөт.

Колдонуу чөйрөсү: Иштин натыйжалары турбуленттүү агымдарды математикалык моделдөө ыкмасына белгилүү бир салым кошот. Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча колдонулган OpenFOAM7 ачык пакетин текшерүүнү, пакетти ийне-жибине чейин документтештирүүнү өнүктүрүүнү өзгөчө баса белгилөө керек.

РЕЗЮМЕ

диссертации Калмурзаевой Анипы Ташбаевны на тему: «Анализ вычислительных погрешностей метода контрольных объёмов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

Ключевые слова: турбулентность, дискретизация, метод контрольных объёмов, методы интерполяции, OpenFOAM7.

Объект исследования. Численное решение систем стационарных и нестационарных уравнений Навье-Стокса в пакете OpenFOAM7.

Предмет исследования. Методы дискретизации уравнений Навье-Стокса методом контрольных объёмов пакета OpenFOAM7.

Цель исследования. Выбор модели и развитие метода моделирования течений несжимаемой жидкости и газа в рамках бесплатного прикладного пакета OpenFOAM7 на примере численных расчетов возможного наводнения в пойме реки Нарын вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

Метод исследования. Математическое моделирование задач вычислительной гидродинамики в пакете OpenFOAM7.

Полученные результаты и их новизна:

1. Проведена верификация пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Обнаружено, что при ламинарном обтекании круглого цилиндра использованные схемы третьего и второго порядка точности по числу Струхаля дают значение 0.172, что согласуется с экспериментальными и численными данными с точностью 4.2%. Схемы первого порядка MinmodV и upwind дают на 8.4% и 14% заниженные значения числа Струхаля соответственно.
2. Разработан метод оценки остаточной погрешности на грани контрольного объема для течения в канале с каверной. Построена автоматическая процедура адаптации сетки в областях с большими градиентами давления и скорости, путем повторного определения ячеек, разделяющих грань с большой ошибкой, разделением их параллельно грани.
3. Предложен метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки для задач обтекания модели здания и реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай. Этот метод позволяет эффективно проводить численное моделирование возможного наводнения, составить карту затопления этой местности.
4. Проведён расчет возможного наводнения вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных значений начальной высоты водного столба H_0= 5м, 10м и 15м площади затопления имеет разные значения - с ростом начальной высоты растет площадь затопления в зависимости от топологии местности

Область применения: Результаты данный работы вносят определенный вклад в метод математического моделирования турбулентных течений. Особо следует подчеркнуть верификацию использованного открытого пакета OpenFOAM на различных задачах вычислительной гидродинамики, развитие детального документирования пакета.

RESUME

of the dissertation of Kalmurzayeva Anipa Tashbaevna on the topic: "Analysis of computational errors of the control volume method" for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in specialty 05.13.16 - Application of computer engineering, mathematical modeling and mathematical methods in scientific research

Keywords: turbulence, discretization, control volume method, interpolation methods, OpenFOAM7.

The object of the study. Numerical solution of systems of stationary and non-stationary Navier-Stokes equations in the OpenFOAM7 package.

The subject of the study. Methods of discretization of the Navier–Stokes equations by the control volume method of the OpenFOAM7 package.

The aim of the study. Selection of a model and development of a method for modeling of incompressible fluid and gas flows within the framework of the free OpenFOAM7 applied package on the example of numerical simulations of possible flooding in the floodplain of the Naryn River near the village of Shamaldy-Sai, Kyrgyzstan.

The research method. Mathematical modeling of computational fluid dynamics problems in the OpenFOAM7 package.

The results obtained and their novelty:

1. Verification of the OpenFOAM7 package was carried out on various computational fluid dynamics problems. It was found that for laminar flow around a round cylinder, the used schemes of the third and second order of accuracy in terms of the Strouhal number give a value of 0.172, which is consistent with experimental and numerical data with an accuracy of 4.2%. The first-order schemes MinmodV and upwind give 8.4% and 14% underestimated values of the Strouhal number, respectively.

2. A method has been developed for estimating the residual error on the edge of the control volume for flow in a channel with a cavern. An automatic procedure for adapting the grid in areas with large pressure and velocity gradients is constructed by re-determining the cells separating the face with a large error by dividing them parallel to the face.

3. A method of automatic construction of a three-dimensional computational grid for the problems of flow around the building model and the real terrain of the floodplain of the Naryn River near the village of Shamaldy-Sai is proposed. This method makes it possible to effectively carry out numerical modeling of possible flooding, to make a flooding area map.

4. A possible flood was calculated near the village of Shamaldy-Sai, Kyrgyzstan. It was found that for three different initial heights of the water column H_0 = 5m, 10m and 15m, the flooding area has different values - with an increase in the initial height, the flooding area increases depending on the topology of the terrain

Scope of application: The results of this work make a certain contribution to the method of mathematical modeling of turbulent flows. The verification of the OpenFOAM package used for various computational fluid dynamics tasks, the development of detailed documentation of the package should be emphasized.

Формат 60х84 1/16. Объем 1,5 п.л.
Бумага офсет. Печать офсет. Тираж 100 экз.

ЧП «Сарыбаев Т.Т.»
г. Бишкек, ул. Раззакова, 49
т. 0 708 058 368