ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА

УДК: 519.6:004
DOI 10.33514/1694-7851-2024-2/1-284-297

Турганбаева А. Б.
ага окутуучу
Ош мамлекеттик педагогикалык университети
Ош ш.
akpari1989@gmail.com
Сагыналиева А. Б.
магистрант
И. Арабаев атындагы Кыргыз мамлекттик университети
Бишкек ш.
sagynalievaaijan0@gmail.com
Орозбаев А.М.
аспирант
И. Арабаев атындагы Кыргыз мамлекттик университети
Бишкек ш.
aorozbaev.@oshsu.kg

ОШ ШААРЫНДАГЫ СУЛАЙМАН ТООНУН ТАТААЛ ТОПОГРАФИЯСЫН ЭСКЕ АЛУУ МЕНЕН ЭСЕПТӨӨЧҮ ТОРДУ ТУРГУЗУУНУН АЛГОРИТМИ ЖАНА ЫКМАСЫ

Аннотация. Бул макалада OpenFOAM программасынын жардамы менен татаал рельефте атмосфералык агымдарды моделдөө үчүн иштелип чыккан алдын ала жана андан кийинки иштетүү куралдары жана процедуралары берилген. OpenFOAM7 программасынында бардык тесттер жана моделдөө жүргүзүлгөн. Кыргызстандын Ош шаарындагы Сулайман тоосу аймактын татаал топографиясын эске алуу менен үч өлчөмдүү структураланбаган эсептөө торчосун түзүү мисал катары каралды.

Негизги сөздөр: моделдөө, атмосфералык агымдар, татаал рельефтин топографиясы, үч өлчөмдүү структураланбаган эсептөөчү тор, OpenFOAM, Сулайман тоо.

Турганбаева А. Б.
старший преподаватель
Ошский государственный педагогический университет
г. Ош
akpari1989@gmail.com
Сагыналиевна А. Б.
магистрант
Кыргызский государственный университет имени И.Арабаева
г. Бишкек
sagynalievaaijan0@gmail.com
Орозбаев А.М.
аспирант

Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева
г. Бишкек
aorozbaev.@oshsu.kg

АЛГОРИТМ И МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ С УЧЕТОМ СЛОЖНОЙ ТОПОГРАФИИ ГОРЫ СУЛАЙМАН г. ОШ

Аннотация. В данной статье представлены разработанные инструменты и процедуры предварительной, и постобработки для моделирования атмосферных потоков над сложной местностью с использованием OpenFOAM. Все тесты и моделирование проводились в OpenFOAM7. В качестве примера рассматривается Сулайман гора, в г. Ош, Кыргызстан, для создании трёхмерной неструктированной расчетной сетки с учетом сложной топографии местности.

Ключевые слова: моделирования, атмосферные потоки, сложной топографии местности, трёхмерной неструктированной расчетной сетки, OpenFOAM, Сулайман гора.

Turganbayeva A. B.
senior lecturer
Osh State Pedagogical University
Osh c.
akpari1989@gmail.com
Sagynalieva A. B.
master's student
Kyrgyz State University named after I. Arabaev
Bishkek c.
sagynalievaaijan0@gmail.com
Orozbaev A.M.
graduate student
Kyrgyz State University named after I. Arabaev
Bishkek c.
aorozbaev.@oshsu.kg.

ALGORITHM AND METHOD FOR CONSTRUCTION OF A COMPUTATIONAL GRID TAKEN INTO ACCOUNT OF THE COMPLEX TOPOGRAPHY OF MOUNTAIN SULAIMAN, OSH

Annotation. This paper presents developed pre- and post-processing tools and procedures for simulating atmospheric flows over complex terrain using OpenFOAM. All tests and simulations were carried out in OpenFOAM7. As an example, Sulaiman Mountain, in Osh, Kyrgyzstan, is considered to create a three-dimensional unstructured computational grid taking into account the complex topography of the area.

Keywords: modeling, atmospheric flows, complex terrain topography, three-dimensional unstructured computational mesh, OpenFOAM, Sulaiman mountain.

Киришүү.

Бул макала төмөнкүдөй мүмкүнчүлүктөргө жана жөнөкөйлөштүрүүгө негизделип даярдалган:

Түртүлүү же тартылуу күчү жоктугуна. Түртүлүү эффектилери жок стационардык жана идеалдаштырылган нейтралдуу катмарлуу агымдарды моделдөө үчүн инструменттер жана процедуралар иштелип чыккан. Шарттуу тартылуу кучунөн улам гидростатикалык басым да эсепке алынган эмес.

Өсүмдүк катмарынын жетишсиздиги. OpenFOAM программасында беттин тегиздигин моделдөө z_0 – аэродинамикалык тегиздиктин узундугунун таасири менен чектелет, ал өз кезегинде топурак бөлүгүнүн дубал функцияларында эске алынат. Мында жер бетиндеги тегиздиктин бийиктиги жана анын кесепеттери эске алынбайт, бул анын кичинекей тегиздиктин узундуктарын колдонууну чектейт.

Кориолис күчүнүн жоктугу. Белгилүү болгондой, OpenFOAM программасындагы негизги өзгөрмөлөрдүн транспорттук тендемелери Кориолис күчүнүн таасирин эске алат. Бул жөнөкөйлөштүрүүнүн натыйжаларына баа ар бир моделдөө иши үчүн жүргүзүлүшү мүмкүн. OpenFOAM программасында Кориолис күчтөрүн эске алуу менен керектүү өзгөртүүлөрдү киргизүү үчүн, [1, 2] ишти карап чыгуу керек.

Кысылбаган жана кургак аба. Бул илимий-изилдөө иши үчүн аба кургак жана кысылбаган деп эсептелген жана каралып чыккан библиографиялык булактарга ылайык, бейтарап катмарланган АПС агымдарын моделдөөнүн учурдагы практикасы болуп саналат жана анын акыркы натыйжаларга тийгизген таасирин эске албай коюуга болот. Мындан ары Ош шаарындагы жайгашкан Сулайман тоосунун татаал топографиясын эске алуу менен эсептөөчү торду куруунун алгоритмин жана ыкмасын карап чыгабыз.

1. Маселенин коюлушу.

Жердин же каралып жаткан аймактын татаал рельефин эсепке алуу менен үч өлчөмдүү структураланбаган эсептөөчү торду түзүү маселеси турат. Мисал катары, Кыргызстандын Ош шаарындагы Сулайман тоосун карайбыз (1а-сүрөттү караңыз) [3-5].

1-Сүрөт: а) Кыргызстан, Ош ш. Сулайман тоо. б) GRASS GIS 8.0 программасынын иштөө чөйрөсү

GRASS GIS программасынан [6], Ош шаарындагы Сулайман тоосун тандап алыңыз (1b сүрөт). Андан кийин, бул программанын чөйрөсүндө Сулайман тоосунун жанындагы рельефти DEM (*digital elevation model* – санариптик бийиктик моделинде) форматында сактап алабыз [7]. Андан кийин, Питон тилинде жазылган биздин программанын жардамы менен, DEM форматынын топографиялык маалыматтарды STL – стерелитографиялык форматка өзгортүп алабыз. STL – форматындагы топографиялык маалыматтар ASCII текст форматында жана *constant / triSurface* OpenFOAM7 программасында папкага сакталат. Андан кийин, биздин SnappyHexMeshDict программасын колдонуп, SnappyHexMesh утилитасы менен (8] Сулайман тоонун үч өлчөмдүү эсептелген тору түзүлөт.

OpenFOAM пакетинедеги SnappyHexMesh утилитасы кызматы үч өлчөмдүү торду түзүү үчүн иштелип чыккан. Тор геометриянын негизинде түзүлөт жана STL форматындагы

файлында жазылат. Мисал катары, Сулайман тоосунун табигый тоскоолдукка агып өтүү процессин моделдөө үчүн тор курулган. Мындан тышкары, ушул жол менен курулган эсептелген торду колдонуп, Сулайман тоонун жакын жайгашкан жери боюнча экологиялык жактан зыяндуу аралашмаларды жайылтуу процесси боюнча таасирине гидродинамиканы эсептөө ыкмаларын колдонсо болот.

2. Маселени чечүү алгоритми.

Тапшырманы чечүү үчүн бүткүл алгоритм төмөнкү баскычтардан турат:

SnappyHexMesh колдонуп торду түзүү. SnappyHexMesh утилитасын жүктөөдөн мурун, төмөнкү операцияларды жүргүзүү керек:

- STL форматында аймактын бетин камтыган экилик же ASCII форматындагы файлды даярдоо керек. Файл /constant/triSurface папкасында жайгашкан болушу керек.

- эсептелген аймакты аныктаган жана тордун тыгыздыгынын негизги деңгээли болуп саналган "фондук" гексаэдральдык (алты жүздүү) торду түзүү.

- snappyHexMeshDict файлын системалык папкада тиешелүү маалыматтар менен түзүңүз, анын тексти тиркемеде келтирилген.

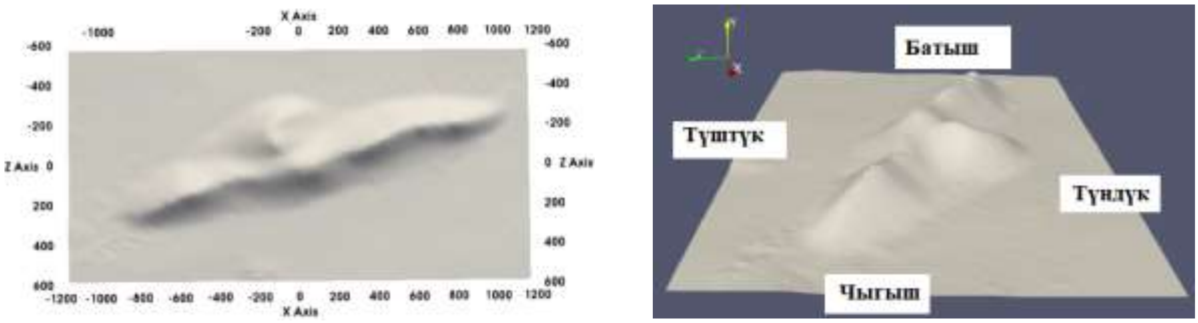
«Фондук»торлорду даярдоо. Фондук торду түзүүнүн эң оңой жолу – blockMesh программасын колдонуу, ал төмөнкү шарттарды канааттандырышы керек:

- тор гексаэдрдик элементтерден гана турушу керек.

- элементтин тараптардын катышы, жок дегенде, келечекте кесүү процедурасы колдонула турган беттин жанында болжол менен 1ге барабар болушу керек.

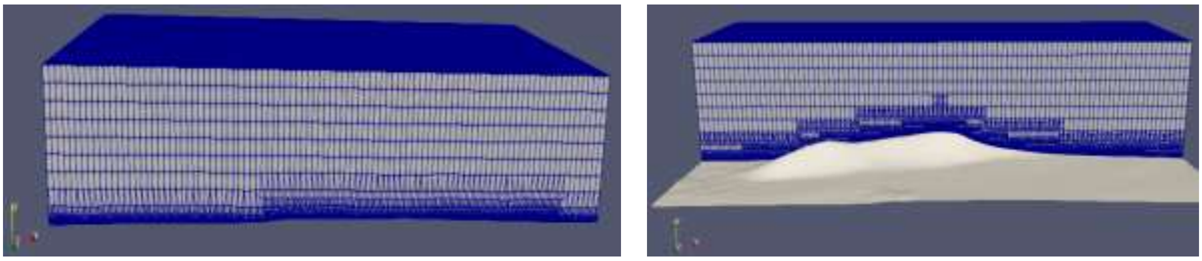
- уячанын четинин келечекте кесүү процедурасы колдонула турган бети менен кеминде бир кесилиши болушу керек.

Фондук тор болжолдуу аймактын алгачкы бөлүгүн аныктайт. Эгерде сиз торду жакшыртуу үчүн кийинчерээк параметрлерди койбосоңуз, анда фондук тор акыркы тор болуп калат. Ушундай жол менен курулган Сулайман тоонун акыркы үч өлчөмдүү рельефи 2а-сүрөттө, ал эми координаттар системасы мейкиндик менен 2б-сүрөттө көрсөтүлгөн.



2-сүрөт: a) Сулайман тоонун OpenFOAMда импорттолгон рельефи.
b) Горизонттун жана координаттар тутумунун жагы

SnappyHexMesh орнотуулары учурдагы snappyHexMeshDict окуу файлдарынын жана анын кодуна комментарийлердин негизинде ар дайым сыноо жана ката процедурасынан кийин жасалган. STL бети ийгиликтүү тор блогуна айландырылганына карабастан, натыйжалар рельефтин бетине жакын жерде өтө структураланбаган аспектти көрсөттү (3а-сүрөттү караңыз) жана акыркы тордогу клеткалардын жалпы санын так көзөмөлдөө мүмкүн эмес.



3-сүрөт: a) Сулайман тоосунун үч өлчөмдүү эсептөө торчосу.
b) z= 0 боюнча эсептөө торунун кесилиши

Тордун сапатын жер бетине жакын жерде жакшыртууга болору [9] жыйынтыктарында көрсөтүлгөн, бирок snappyHexMesh утилитасынын өндүрүмдүүлүгү жеткиликтүү эсептөө ресурстарынан [10] жана ар бир топография үчүн SnappyHexMeshDict файлындагы параметрлерди орнотууда колдонуучунун чеберчилигинен көз каранды.

3. PassiveScalarPimpleFoam жаңы чечүүчүсүн түзүү

Бул жерде маселенин жалпылыгы үчүн стационардык эмес чечүүчүнүн абалын карап чыгабыз жана тиешелүү теңдемелерде убакыттын туундусун нөлгө салуу менен стационардык чечүүчүнү оңой эле алууга болот. OpenFOAM пакети – бул физикалык процесстердин ишке ашырылган моделдеринин кеңири топтомун жана континуум механикасынын ар кандай маселелери үчүн чечүүчүлөрдү камтыган ачык булак программалык пакети.

PimpleFOAM чечүүчү [11] – туруксуз турбуленттүү агым маселелерин моделдөө үчүн универсалдуу чечим жана стационардык эмес PISO алгоритминин кеңейтилиши PIMPLE алгоритмине негизделген [12, 13], жөнөкөй сырткы ондоо циклин кошуу менен, PISO алгоритминин негизиндеги чечүүчүлөргө мүнөздүү болгон максималдуу Курант санын чектөөнү жеңилдетүү.

PIMPLE алгоритми тууралуу кененирээк маалыматты [11-15] иштерден таба аласыз. OpenFOAMде ишке ашырылган pimpleFoam чечүүчүсү изотермикалык шарттарда Ньютон суюктуктарынын убактылуу, турбуленттүү кысылбаган агымдарын моделдөө үчүн ылайыктуу. Бул жерде биздин максат pimpleFOAM чечүүчүгө кошумча пассивдүү скалярдык транспорттук теңдемени кошуу.

Жылуулук өткөрүп берүү мындай чечүүчү үчүн эң популярдуу колдонмо болгондуктан, температура үчүн T тамгасы менен пассивдүү скалярды белгилейли. Рейнольдс орточо өткөрүп берүү теңдемесин pimpleFoamде программасында ишке ашырууну көздөгөнүбүз төмөнкүчө көрүнөт:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+U_j\frac{\partial T}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial x_j}-\overline{\theta u_j}\right) \qquad (1)$$

мында α жана $Pr = \nu/\alpha$ – молекулярдык жылуулук диффузия жана молекулярдык Прандтл саны, ν – газдын кинематикалык илешкектүүлүгүнүн коэффициенти. T – жалпы пассивдүү скаляр болгон учурда, α – анын молекулалык диффузиясын, ал эми Pr – анын Шмидт молекулалык санына туура келет. Жогорудагы теңдеменин оң жагындагы акыркы мүчө пассивдүү скаляр T жана RANS турбуленттүүлүгүнүн моделиндеги Рейнольдстун орточо операциясынын натыйжасы катары стандарттуу конвекция-диффузия теңдемесинде кошумча ачык термин катары көрүнөт.

Тармактын масштабдуу турбуленттүү агымын билдирген окшош ачык термин теңдемеде LES турбуленттүүлүгүнүн моделинде аткарылган мейкиндик чыпкалоо операциясынын натыйжасында пайда болот [12, 13]. Бул мүчө (1) теңдемесин жабуу жана чечүү үчүн ылайыктуу моделди талап кылат. Ишке ашырууда биз жөнөкөй градиенттик диффузиялык гипотезаны колдонобуз жана скалярдык градиенттин функциясы катары турбуленттүү скалярдык агымды туюндурат

$$\overline{\theta u_j} = -\alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \tag{3}$$

мында α_t – турбуленттүү жылуулук диффузия (же жалпы пассивдүү скаляр үчүн турбуленттүү диффузия). Турбуленттүү Прандтл саны Pr_t термини турбуленттүү Прандтл санын билдирет (жалпы пассивдүү скаляр үчүн турбуленттүү Шмидт санына туура келет) жана туруктуу деп болжолдонот – адатта 0,8-1,0 диапазондо кабыл алынат. Акыркы эки теңдемени (1) теңдемеге өткөрүп берүүнүн теңдемесин pimpleFoam программасында ишке ашырылат жана төмөнкү акыркы вариантына алып келет, б.а.

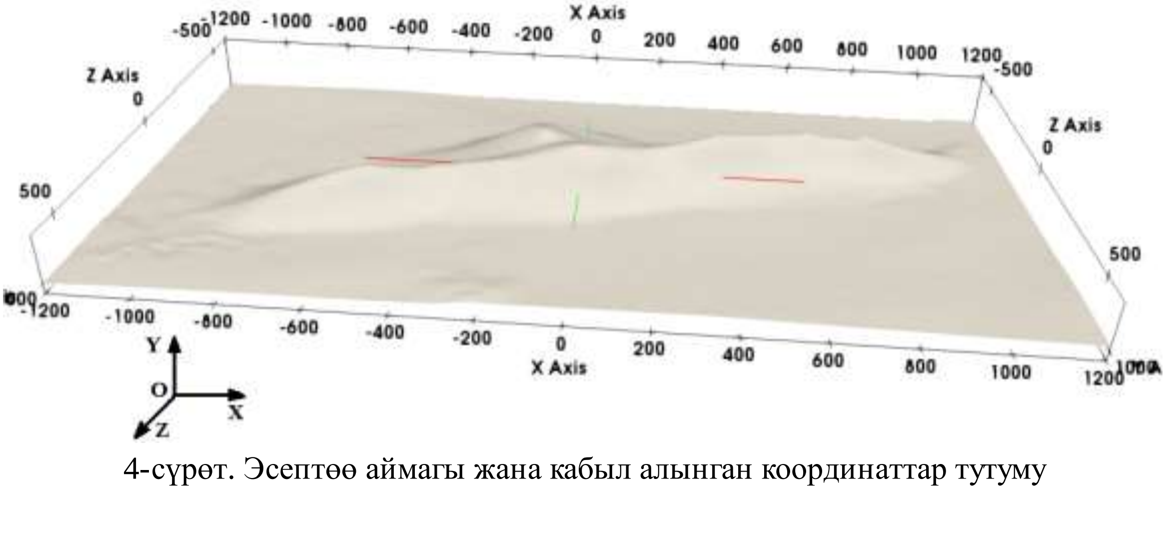
$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \tag{4}$$

мында α_{eff} – молекулалык жана турбуленттүү өткөрүп берүүнүн таасирин эске алуу менен эффективдүү жылуулук диффузиясы. Температурадан башка жалпы пассивдүү скалярда α_{eff} – молекулалык жана турбуленттүү массанын диффузия коэффициенттеринин суммасы болуп саналат.

Биздин кийинки милдет – жогорудагы (4) теңдемени passiveScalarPimpleFoam программасында чечүүчүбүздө ишке ашыруу, pimpleFoam чечүүчүгө негизделген. Жаңы чечүүчүнү нөлдөн баштап түзүүнүн ордуна, учурдагы pimpleFoam чечүүчү алгоритминен баштоо жана жөн гана коддун керектүү саптарын киргизүү алда канча ыңгайлуу.

4. Сулайман тоонун айланасындагы агымдын эсептөө

Маселенин коюлушу. Ош шаарынын Сулайман тоосунун мисалында, итерация процессинин конвергенциясына пассивдүү аралашмаларды өзгөртүп берүүчү теңдемедеги конвективдик мүчө үчүн түрдүү дискреттөө схемаларынын таасирин изилдөө маселесин карайбыз (4-сүрөттү караңыз).



4-сүрөт. Эсептөө аймагы жана кабыл алынган координаттар тутуму

Аба агымы солдогу эсептелген аймакка 10 м/с ылдамдыкта кирет. Киргизүү ылдамдык вектору *Ox* боюнча багытталат.

Каралып жаткан маселенин *математикалык негизин* (5-8) теңдемелер системасы түзөт. Маселени сандык түрдө ишке ашыруу биз сунуш кылган passiveScalarPimpleFoam чечүүчү стационардык версиясынын негизинде ишке ашырылат – passiveScalarSimpleFoam. Чек аралык шарттар, дискреттөө ыкмалары жана сызыктуу алгебралык теңдемелердин системаларынын чечимдери жөнүндө маалымат төмөнкү 1-3 таблицаларда келтирилген.

1-таблица. Колдонулган чек ара шарттары

Өзгөрмөлөр / **Чек арасы**	**U**	**ω**	**k**	**ε**
inlet	type fixedValue; value uniform (10 0 0);	type fixedValue; value uniform 39.61;	type fixedValue; value uniform 0.375;	type fixedValue; value uniform 14.855;
outlet	type zeroGradient;	type zeroGradient	type zeroGradient	type zeroGradient
top	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
side1	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
side2	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
Sulaiman	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;

Эсептөө аймагынан чыгууда басым үчүн, нөлдүк чектелген мааниге (Дирихле шарты), ал эми башка бардык чек араларга – нөлдүк градиентке (Нейман шарты) коюлат.

2- таблица. Колдонулган дискретизациялоо схемалары

Слагаемое	**Схема**	**Порядок схемы**

Градиент	Gauss linear	Второй
Конвекция Скорость k, ε, ω, T	Gauss linear upwind grad(U) Gauss upwind Gauss upwind	Второй Первый Первый
Лапласиан	Gauss linear corrected	Второй

Пассивдүү аралашма *T* концентрациясынын чектик шарты *T*=1 мааниси бар сызыктуу булак түрүндө көрсөтүлөт (Дирихле шарты) жана чыгууда Нейман шарты коюлат – нөл узунунан градиент (нөлдүк градиент). Жана эсептөө аймагынын бардык башка чек араларында *T*=0 шарты көрсөтүлгөн. Чечүүчүлөр жөнүндө маалымат таблицада келтирилген.

3-таблица. Негизги өзгөрмөлөр үчүн теңдемелерди чечилиши

Өзгөрмөлөр	Чечүүчү	Тактыгы
Басым	Градиентке байланыштуу ыкма GaussSeidel жылмакай колдонуу менен GAMG	$1e^{-3}$
U, k, ε, ω,T	GaussSeidel жылмакай колдонуу менен smoothSolver	$1e^{-3}$

Сулайман тоосунун айланасындагы агым боюнча илимий адабияттарда тиешелүү эксперименталдык жана сандык маалыматтар жок болгондуктан, алынган натыйжалардын ишенимдүүлүгү төмөндөгүдөй түз текшерилет. Биринчиден, каныккан эффект үчүн эсептөө торчосу изилденген. Эсептөөдө 4 түрдүү эсептөө торчолору колдонулган. Сулайман тоосунун айланасындагы агымда колдонулган эсептөө торлору боюнча маалыматтар 4-таблицада келтирилген.

4 – таблица. Эсептөө торлордун маалыматтары

	Гэксаэдр	Призма	Клин түрүндөгү тетраэдры	Полиэдр	Клеткалардын саны
Mesh1	154 111	1 475	22	21 164	176 772
Mesh2	415 421	3 312	59	47 610	466 402
Mesh3	906 465	5 936	73	84 895	997 369
Mesh4	2 664 824	7 587	62	271 102	2 943 575

Экинчиден, системалуу эсептөөлөр көрсөткөндөй, алынган сандык натыйжалар кээде (4) пассивдүү аралашмаларды берүү теңдемесинин конвективдик мүчөсүн дискреттөө үчүн колдонулган ыкмадан көз каранды. Ошондуктан, бул жагымсыз факторду болтурбоо үчүн төрт топтун 17 түрдүү схемалары колдонулган – борбордук-айырма схемалар тобу, – жогорку агым тобу, – TVD жана – NVD дискретизациялоо схемалары [16], алар 5-таблицада келтирилген.

Бул схемалардын скалярдык талаалар үчүн адистештирилген версиялары бар, алардын маанилери адатта 0 жана 1 сандарынын ортосунда чектелет. Биздин учурда, мааниси 0 жана 1 ортосунда чектелген скалярдык талаа T пассивдүү аралашмасынын концентрациясы болуп саналат. OpenFOAM программасында төмөнкү схемалар үчүн катуу чектелген версиялар бар: limitedLinear, vanLeer, Gamma, limitedCubic, MUSCLE жана SuperBee.

5 – таблица. Пассивдүү аралашмалар үчүн колдонулган дискретизациялоо схемалары.

Схемалар	Баяндап жазуу
Борборлоштурулган схемалар	
linear	Сызыктуу интерполяция менен борбордук айырма

	схемасы
midPoint	Симметриялык салмактуулук коэффициенти менен сызыктуу интерполяция схемасы
Агымга каршы схемалар	
upwind	Биринчи тартиптеги агымга каршы схемасы
linear Upwind	Экинчи тартиптеги агымга каршы сызыктуу айырма схемасы
filteredLinear2	Сызыктуу схемалардын чексиз чектөөсү менен экинчи тартиптеги чектелбеген схема
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics – үч чекиттүү салмактуу квадраттык интерполяциянын айырма схемасы
TVD схемалары	
limitedCubic	куб түрүндөгү чектегич менен схема
limitedLinear1	Linear upwind differencing – агымга каршы сызыктуу айырма схемасы
Minmod	Minimum modulus – чексиз биринчи тартиптеги тактык
MUSCL01	Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws – экинчи тартиптеги агымга каршы багытталган сакталуу мыйзамдарынын монотондук схемалары
SuperBee	экинчи тартиптеги тактык чектелген схема
vanLeer	экинчи тартиптеги тактык чектелген схема
limitedVanLeer	экинчи даражадагы тактык схемасы, анын параметрлери скалярдык талаалардын маанилерин колдонуучу белгилеген чектөөлөр
NVD схемы	
Gamma ϕ	Gamma дифференцирлөө салмактык коэффициент ϕ менен
SFCD	Self-Filtered Central Differencing – экинчи даражадагы тактык чектелген схема

Эсептөө жыйынтыктары жана талкуу. k-ε – турбуленттүү моделин колдонууда пассивдүү аралашмаларды өткөрүп берүү теңдемесинде конвективдик мүчө үчүн ар кандай дискреттөө схемаларын колдонууда эсептөө убактысы жана итерациялардын саны 6-таблицада келтирилген.

6-таблица. Итерациялардын саны жана эсептөө убактысы

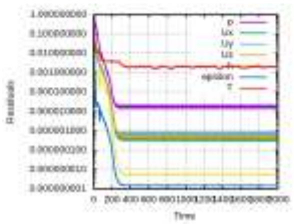
Эсептөө торчосу	**Mesh1**		**Mesh2**		**Mesh3**	
Айырма схемасы	Итерациялар	Убакыт	Итерациялар	Убакыт	Итерациялар	Убакыт
Борборлоштурулган схемалар						
linear	231	224.9	243	430.6	304	1786

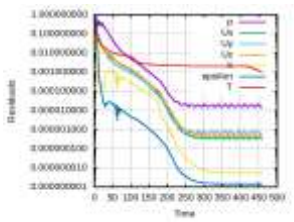
midPoint	219	209.7	239	385.6	303	1836
Агымга каршы схемалар						
QUICK	182	184.6	218	364.1	284	1140
filteredLinare2	200	174.2	230	378.5	296	1811
linearUpwi nd	119	119.9	158	309.5	199	773.3
Upwind	119	118	158	264.3	199	726.8
TVD схемалары						
limitedCubic	192	131.1	219	584.6	283	1459
limitedLinear1	179	178.9	217	361.5	280	1532
Minmod	171	118.1	204	338.6	262	1008
MUSCL01	195	117.5	229	378.7	297	1112
SuperBee	2000 тактыкка жеткен жок 255 при 0.5	1137 137.8 при 0.5	2000 тактыкка жеткен жок 350 при 0.5	3317 560.3 при 0.5	2000 тактыкка жеткен жок 458 при 0.5	7608 1657 при 0.5
vanLeer	181	100.4	219	355.9	285	1051
limitedVanLeer	181	132.3	219	493.4	285	1570
NVD схемалары						
Gamma0	221	217.8	231	548.3	296	1818
Gamma0.5	184	183	221	514	285	1751
Gamma1	175	163.7	210	539.6	273	1023
SFCD	174	96.14	205	470.3	264	1003

Аткарылган жеке эсептөөлөр Mesh4 торунда алынган эсептөө натыйжалары Mesh3 торундагы тиешелүү маалыматтар менен дээрлик бирдей экенин көрсөтүп турат, ошондуктан Mesh4 тор үчүн сандык натыйжалар бул жерде берилген эмес.

Белгилей кетсек, 16-таблицада келтирилген дискреттөө схемаларын колдонуу менен бардык эсептөөлөр бирдей шарттарда (чек ара шарттары, дискреттөө ыкмалары жана CATC чечимдери, төмөнкү релаксация коэффициенттери) жүргүзүлгөн.

Бул учурда SuperBee схемасы 5-сүрөттө көрсөтүлгөндөй пассивдүү өткөрүү үчүн аралашма теңдемесин (4) чечүүдө 0,7 релаксация коэффициенти менен SIMPLE итерациялык процесстин монотондуу конвергенциясына алып келбейт.





5-сүрөт. a) 0,7 релаксация коэффициентиндеги калдыктар. b) 0,5 релаксация коэффициентиндеги калдыктар

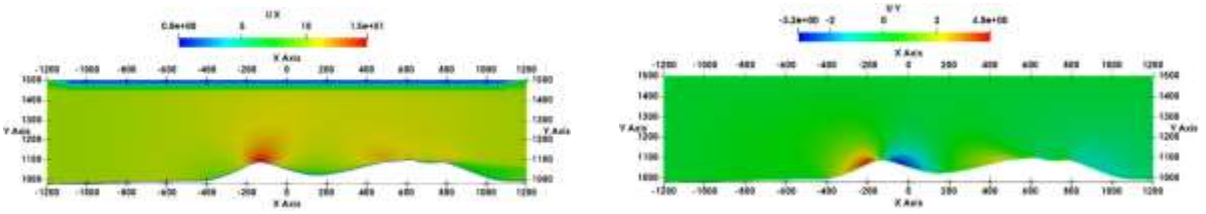
Эгерде сиз төмөнкү релаксация коэффициентин 0,7 мааниден 0,5 мааниге өзгөртсөңүз, анда кайталануучу процесстин конвергенциясы жакшырат (5b-сүрөттү караңыз). TVD схемаларынын арасында vanLeer жана limitedVanLeer схемалары бардык үч тордогу схемалар Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 бирдей сандагы итерацияларга алып келет - 181, 219 жана 285.

Бирок, LimitedVanLeer схемасы үчүн эсептөө убактысы Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 торлорундагы vanLeer схемасы үчүн көп эсептөө убактысынан тиешелүүлүгүнө жараша 31,77%, 38,64% жана 49,38%, б.а. LimitedVanLeer схемасынын эсептөө эффективдүүлүгү Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 торлорундагы vanLeer схемасынын эсептөө эффективдүүлүгүнөн 31,77%, 38,64% жана 49,38% аз. Ушундай эле көрүнүш upwind жана linear Upwind схемаларын колдонууда байкалат – Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 үч торчолордогу итерациялардын саны, эки схема үчүн итерациялардын саны 119, 158 жана 199 барабар.

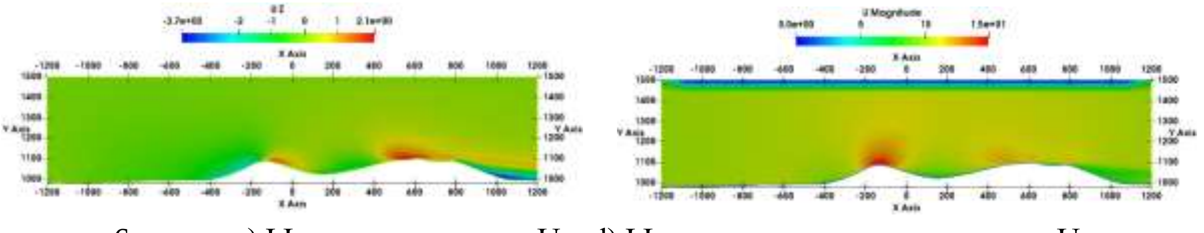
Бирок, LinearUpwind схемасы үчүн Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 торлорунда эсептөө убактысы linearUpwind схема үчүн эсептөө убактысынан тиешелүүлүгүнө жараша 1,61%, 17,1% жана 6,4% көбүрөөк.

Каралган төрт NVD схемасынын ичинен бир итерацияга сарпталган убакыт боюнча SFCD схемасы эң эффективдүү болуп чыкты – бул жолу үч эсептөө Mesh1, Mesh2 жана Mesh3 торчолорунда жараша 0,553с, 2,294с жана 3,799с барабар тиешелүүлүгү болгон.

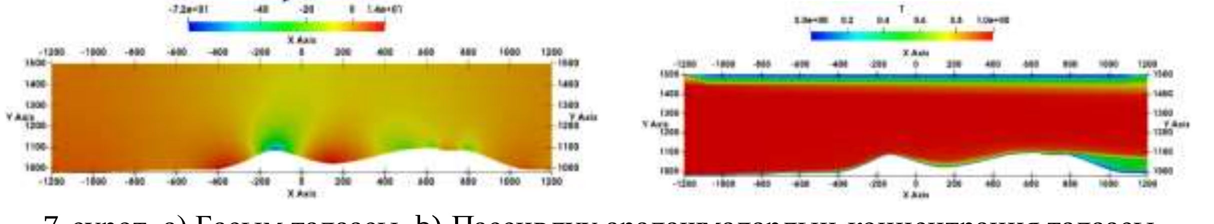
Төмөнкү сүрөттөрдө компоненттин талааларын (6abc-сүрөт) жана ылдамдык модулунун (6d-сүрөт), басымдын (7 a)-сүрөт) жана начар аралашма концентрациясынын (7 b)-сүрөт) z = –200 м тегиздигинде көрсөтөт. Аба шамалынын багыты солдон оңго карай.



6-сүрөт. a) Ылдамдык талаасы Ux. b) Ылдамдык талаасы Uy.



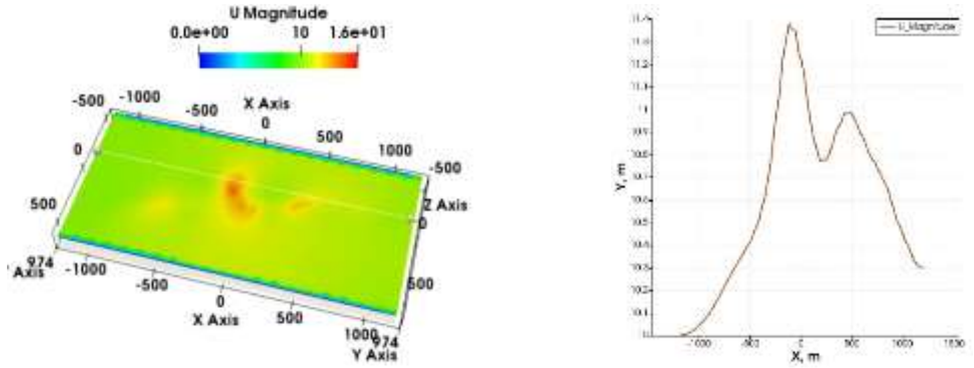
6-сүрөт. c) Ылдамдык талаасы Uz. d) Ылдамдык модулунун талаасы U.



7-сүрөт. a) Басым талаасы. b) Пассивдүү аралашмалардын концентрация талаасы

Аба агымы биринчи дөңсөөгө жакындаган сайын басым жогорулайт ($x \approx -$ 400 м, 7-сүрөттү караңыз). Андан ары биринчи дөңсөөгө жакындаган сайын агым ылдамдайт,

ылдамдык модулу 11,4 м/с 8 а) -сүрөттө көрүнүп тургандагыдай максималдуу маанисине жетет.



8-сүрөт. а). Тегиздиктеги ылдамдык модулунун талаасы *y*=1131,4 *мм*.
b). Тегиздиктеги агымдын ылдамдануусу *z* = -200 *м*

Тегиздиктеги *y* = 1131,4 *мм* бийиктиктеги аба агымынын ылдамдануусу 9 b)-сүрөттө көрсөтүлгөн.

Төмөндөгү 7-таблицада (4) пассивдүү аралашмаларды ташуунун теңдемесинде конвективдик мөөнөт үчүн дискреттөө схемасынын таасирин изилдөөнүн натыйжалары көрсөтүлгөн.

Пассивдүү аралашмалардын концентрациясы үч таяныч пункттарында тандалып алынган P1(-265 1058,57 -50), P2(550 1025,63 0) жана P3(120 1005,68 -280).

7-таблица. Тачяныч чекиттердеги пассивдүү аралашмалардын концентрациясы

Чекиттер	**P1**	**P2**	**P3**
Борборлоштурулган схемалар			
linear	0.5322	0.01684	0.06456
midPoint	0.4491	0.02818	0.06286
Агымга каршы схемалар			
QUICK	0.4516	0.005418	0.05886
filteredLinare2	0.5165	0.01193	0.06092
linearUpwind	0.3626	0.313	0.06895
Upwind	0.6137	0.4438	0.1823
TVD схемалары			
limitedCubic	0.4931	0.05008	0.0713
limitedLinear1	0.5375	0.06958	0.08088
Minmod	0.5591	0.09488	0.09302
MUSCL01	0.4364	0.05804	0.06153
SuperBee	0.403	0.006198	0.04272
vanLeer	0.4913	0.04048	0.07086
limitedVanLeer	0.4913	0.04048	0.07086

NVD схемалары			
Gamma 0	0.5011	0.0352	0.07188
Gamma 0.5	0.5317	0.02615	0.07218
Gamma 1	0.5571	0.03365	0.08224
SFCD	0.5654	0.04027	0.08548

Изилдөөнүн натыйжалары жалпысынан булгоочу заттардын пассивдүү өзгөртүү теңдемесинде конвективдик мүчөнүн дискретизациялоонун таасирин эң жакшы натыйжаларды берген так сандык схема жок экендигин көрсөтүп турат. VanLeer жана LimitedVanLeer үч таяныч пункттарында пассивдүү аралашманын концентрациясынын бирдей маанилерин берери аныкталган.

Эсептөөлөр көрсөткөндөй, үч таяныч пунктунун P2 жана P3 чекиттериндеги пассивдүү аралашмалардын концентрациясы P1 чекитиндеги концентрация маанилеринен болжолдуу түрдө төмөн. Демек, P2 жана P3 чекиттериндеги экологиялык комфорттун даражасы P1 чекитине караганда тартиби жогору деп айтууга болот.

Корутунду

Бул макалада Ош шаарындагы Сулайман тоонун татаал топографиясын эске алуу менен структураланбаган эсептөөчү торду тургузуунун алгоритми жана ыкмасы талкууланат.

Ubuntu 20.04 LTS операциялык тутумунда орнотулган OpenFOAM ачык пакетинин алкагында пассивдүү аралашманын стационардык эмес таралышын моделдөө үчүн жаңы passiveScalarPimpleFoam чечүүчү түзүлдү.

Түзүлгөн passiveScalarPimpleFoam чечүүчүсү Кыргызстандын Ош шаарындагы Сулайман тоосунун мисалында бир жана мезгилдүү дөңсөөнүн жана табигый тоскоолдуктун айланасындагы агымды тестирлөө үчүн сыналган.

Адабияттардын тизмеси

1) Wyngaard J. Turbulence in the Atmosphere. Cambridge University Press, 2010, p.393
2) Download v7 | Ubuntu. https://openfoam.org/download/7-ubuntu/
3) Жайнаков А.Ж. Использование утилиты snappyHexMesh для генерации расчетной сетки. [Текст] Жайнаков А.Ж. Курбаналиев А.Ы. Осконбаев М.Ч. Турганбаева А.Б. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем Материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. – 2018г. Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК – С.219-227.
4) Курбаналиев А.Ы. Моделирование обтекания местности со сложным рельефом в пакете OpenFOAM. [Текст]/Курбаналиев А.Ы., Осконбаев М.Ч., Турганбаева А.Б. // Известия Ошского технологического университета им. академика М.М. Адышева. – 2018г. №1-1 – С.122-127
5) Осконбаев М.Ч. Численное моделирование турбулентного обтекания горы Сулайман [Текст]/Осконбаев М.Ч., Турганбаева А.Б. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем. Материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. – 2019г.: – Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2019г. – С.59-63.
6) Gasch R. and J. Twele. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Springer, 2002. – P.548
7) Kyrgyzstan - Elevation Model. https://data.humdata.org/dataset/kyrgyzstan-elevation-model.

8) Sladek I., Kozel K., Janour Z. On the 2d-validation study of the atmospheric boundary layer flow model including pollution dispersion. Engineering Mechanics, Vol. 16, 2009, No. 5, – P. 323-333.
9) Sweby P. K. High Resolution Schemes Using Flux Limiters for Hyperbolic Conservation Laws. // SIAM Journal of Numerical Analysis. – 1984. – Vol. 21. – P. 995-1011.
10) Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем. Учебное пособие – Нижний Новгород; Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010.
11) OpenFOAM guide/The PIMPLE algorithm in OpenFOAM. https://openfoamwiki.net/index.php/ OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM.
12) Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002. – P 423.
13) Van Leer B. Upwind and High-Resolution Methods for Compressible Flow: From Donor Cell to Residual-Distribution Schemes. // Communications in computational Physic. – 2006. – Vol. 1. – P. 192-206.
14) OpenFOAM guide/The PISO algorithm in OpenFOAM. http://openfoamwiki.net/index.php/ The_PISO_algorithm_in_OpenFOAM.
15) OpenFOAM guide/The SIMPLE algorithm in OpenFOAM. https://openfoamwiki.net/ index.php/ OpenFOAM_guide / The_SIMPLE_ algorithm_in_OpenFOAM.
16) Wyngaard J. Turbulence in the Atmosphere. Cambridge University Press, 2010, p.393.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент Сабитов Б.А.