

Камшат Серикхановна Зарыкбаева – старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru.

Айым Бауыржанқызы Леонидова* – преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: aiym.leonidova@mail.ru.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru.

Information about the authors

Akmaral Kabidenovna Kinjibekova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Heat Power Engineering Department; Toraigyrova University, Republic of Kazakhstan; e-mail: akmaral70@mail.ru. ORCID: <https://doi.org/0000-0001-5839-3001>.

Zhan Kasenovich Aldazhumanov – Senior Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: jean1974@mail.ru.

Kamshat Serikhanovna Zarykbaeva – Senior Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamshat.ru@mail.ru.

Ayym Bauyrzhankyzy Leonidova* – teacher of the department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aiym.leonidova@mail.ru.

Aigerim Yerkenovna Satybaldinova – teacher of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru.

Редакцияға енуі 15.03.2024

Өңдеуден кейін түсуі 03.04.2024

Жариялауға қабылданды 04.04.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-43

FTAXP: 44.39.01



А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, Е. Медетұлы*

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: medetuli_ernar@mail.ru

ЖЕЛ ТУРБИНАСЫН 3D МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН ТОРДЫ ҚҰРУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

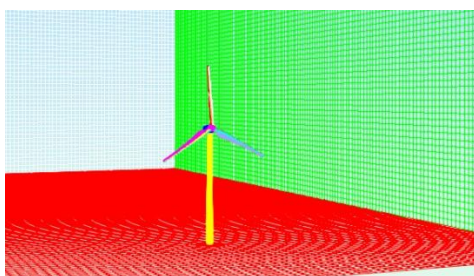
Аңдатпа: Мақалада тұрақты емес ауа ағынымен жел турбинасын 3D модельдеу үшін тор құру міндеті қарастырылады. Мәселені шешу үшін екі тор жасалады: біріншісі айналмалы бөліктен, екіншісі айналмалы емес бөліктен. Сондықтан торды құру үшін OpenFOAM пакетінің бөлігі ретінде blockmesh, snappyHexMesh, transformPoint, reconstructParMesh, mergeMeshes, changeDictionary утилиталары қолданылады. Тордың құрылысындағы негізгі келесі мәселелердің шешімі анықталады: біріншісі-статикалық және қозғалмалы тордың комбинациясы, екінші айналудың осьтерінің ешқайсысына параллель емес (бұл факт snappyHexMesh-пен байланыстыруды және айналуды моментін бағалауды қиындатады). Салынған торлардан алынған мәліметтердің нәтижесінде стационарлық бөлік кеңістіктің үлкен көлемін қамтиды және жоғары ажыратымдылыққа ие. Мысалы, бекітілген бөліктің торы blockmesh көмегімен салынған 6 750 000 ұяшықтан тұрады, тордың бүйірлерінің жалпы саны 20 385 000-ға тең, оның 20 115 000-ы ішкі беттер, ал қалғандары тордың шекаралары. Айналмалы бөліктің деректері жабық тордың 2 965 671 ұяшықтан, 9 447 062 беттен және 3 623 151 нүктеден тұратынын көрсетеді. Демек, айналмалы бөлік турбина қалақтарының геометриясы мен динамикасына бейімделеді. Алынған салынған торлардың деректеріне сүйене отырып, тордың сапасы мен ажыратымдылығы талданады. Алынған тордың жел турбинасының айналасындағы турбулентті ағындарды модельдеу үшін жеткілікті дәлдігі мен бейімделуі көрсетілген.

Түйін сөздер: тор; шешуші; жел турбинасы; утилиталар; алгоритм.

Кіріспе

Жел турбиналары қазба отындарына тәуелділікті төмендететін және парниктік газдар шығындыларын азайтатын жаңартылатын энергияның ең перспективалы көздерінің бірі болып табылады. Дегенмен, жел турбиналарын тиімді пайдалану үшін олардың жұмысына әсер ететін көптеген факторларды ескеру қажет, мысалы, қалақтардың геометриясы, желдің жылдамдығы, шабуыл бұрышы, айналу жиілігі және т.б. бұл қалақтардың қозғалыс динамикасын және ауа ағынымен өзара әрекеттесуін ескере отырып, жел турбиналарының айналуын сандық модельдеуді қажет етеді. Сандық модельдеудің негізгі кезеңдерінің бірі-есептеудің қолайлы уақытында шешімнің жеткілікті дәлдігін қамтамасыз етуі керек сапалы есептеу торын құру.

Жел турбинасының айналуын модельдеу үшін openfoam пакетінің бөлігі болып табылатын rimpleDyMFoam шешуші қолданылады. Бұл шешуші турбинаның қозғалыс динамикасын және ауа ағынымен өзара әрекеттесуін ескеруге мүмкіндік береді. Мәселені шешу үшін екі тор қолданылады: біріншісі айналмалы бөліктен, екіншісі айналмалы емес бөліктен. Екі торды қосу үшін олардың арасындағы шекарада қысым мен жылдамдық өрістерінің үздіксіздігін қамтамасыз ететін арнайы интерфейс қолданылады.



Сурет 1 – Жел турбинасының моделі

Әдістері

Бұл мақалада OpenFOAM пакетін қолдана отырып, стационарлық емес ауа ағынымен көлденең үш қалақты жел турбинасын 3D модельдеуге арналған тор салу әдісі келтірілген. OpenFOAM-бұл түпкілікті көлем әдісіне негізделген үздіксіз орта механикасының мәселелерін шешуге арналған еркін таратылатын бағдарламалар пакеті. OpenFOAM пакетінің құрамында blockMesh және snappyHexMesh сияқты торды құруға арналған әртүрлі утилиталар бар. BlockMesh берілген блок параметрлері бойынша алтыбұрышты ұяшықтардан құрылымдық торлар жасауға мүмкіндік береді. SnappyHexMesh құрылымдық торды ұяшықтарды бөлу, жылжыту және жою арқылы ерікті беттік геометрияға бейімдеуге мүмкіндік береді. snappyHexMeshDict сөздігіне мыналар кіреді: тор жасау процесінің әртүрлі қадамдарын басқаратын жоғарғы деңгейдегі қосқыштар және әр процесс үшін бөлек ішкі каталогтар [1,2].

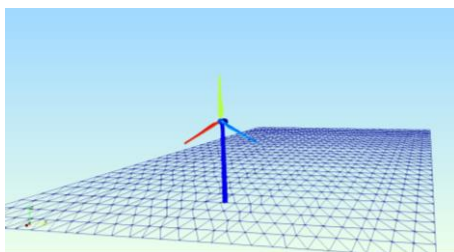
Нәтижелер мен талқылаулар

Торды құру кезінде stl файл пішімінде дайын жел турбинасының геометриялары қолданылады (сурет 1). Жел турбинасының кеңістік өлшемі 480м x 256м x 192м болатын тікбұрышты аймақ болды. Жел турбинасы айналмалы қалақтардан және айналмайтын гондаладан, ступицадан, мұнарадан тұрады.

Айналмалы бөліктің торын жасау тәсілі: фондық торды жасау үшін blockMesh, тордың шекараларын анықтау және нақтылау үшін snappyHexMesh-ты пайдалану. Фондық тор негізгі X, Y, Z осьтеріне тураланған тіктөртбұрыш, бірақ бұл тәсіл айналу осінің негізгі осьтердің ешқайсысымен тураланбағанын ескермейді. Бұл соңғы тордың сапасына әсер етеді. Сәйкесінше тым кішкентай ұяшықтар пайда болады және есептеу уақытын едәуір арттырады. Ұяшық өлшемі неғұрлым аз болса, соғұрлым аз болуы мүмкін болатын ең үлкен мән, ол модельдеудегі уақыт қадамы [3].

Осылайша, айналу осіне тураланған фондық тор ең жоғары сапалы торды жасау үшін жасалады. Әдеттегі айналмалы тор мен айналмалы тордың минималды бетінің ауданын салыстырсақ, бетінің ауданы $1,926 \cdot 10^{-11} \text{ мм}^2$ типтік тор үшін және тураланған тор үшін $0,786 \text{ мм}^2$ құрайды (сурет 2).

Торлардың сандық деректері нүктелер, ұяшықтар және тараптар санымен сипатталады. Нүктелер-айнымалылар есептелетін тор түйіндері. Көп нүктелер-жоғары дәлдікті береді. Ұяшықтар-белгілі бір пішіні мен өлшемі бар тордың көлемді элементтері. Бүйірлері-ұяшықтардың беттері. Ішкі беттер екі ұяшықты бөліп, айнымалыларды қайта санауға әсер етеді.



Сурет 2 – Жел турбины

blockMesh торын салғаннан кейін алынған мәліметтер келесідей:

Кеңістікті шектеу: (-5000 -30000 -27500) (10000 30000 32500)

Нүктелер саны: 6 885 676

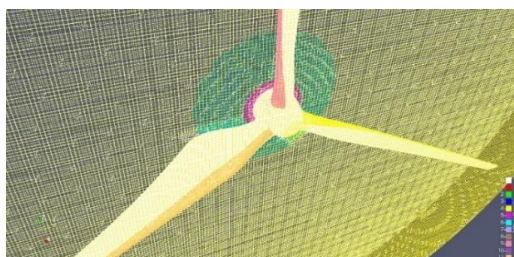
Ұяшықтар саны: 6 750 000

Тараптар саны: 20 385 000

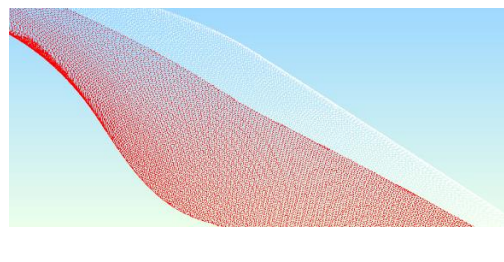
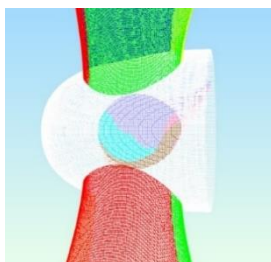
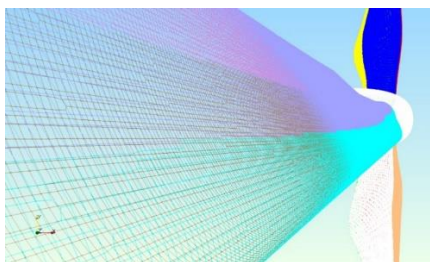
Ішкі қырлары: 20 115 000

blockMesh торын салғаннан кейін алынған деректер тордың жеткілікті жоғары ажыратымдылыққа ие екенін және кеңістіктің үлкен көлемін қамтитынын көрсетеді. Тор 6 750 000 ұяшықтан тұрады, олардың әрқайсысының алты жағы бар. Тор жақтарының жалпы саны 20 385 000-ға тең, оның 20 115 000-ы ішкі беттер, ал қалғандары тордың шекаралары. Тор бұрыштық координаттары (-5000 -30000 -27500) және (10000 30000 32500) бар тікбұрышты параллелепипедпен шектелген.

Surfacefeatures пәрменін пайдаланып, айналмалы бөліктің STL геометриясын eMesh файлдарына жасаймыз. Surfacefeatures утилитасын іске қосып нысандардың шеттері туралы ақпаратты қамтитын *Emesh файлдарын жасау. Бұл қызметтік бағдарламаның параметрлерін system/surface FeatureExtractDict және system/surfacefeaturesdict-тен көруге болады. Фондық тор жасалғаннан кейін оны system/decomposeParDict-те анықталған параметрлермен параллель орындау үшін ыдыратуға болады [4]. Қазіргі уақытта негізгі осьтер бойынша тураланған фондық тор бар, яғни жел турбинының моделінің айналу осіне тураланбаған (Сурет 3).



Сурет 3 – Жел турбинының қалақтары



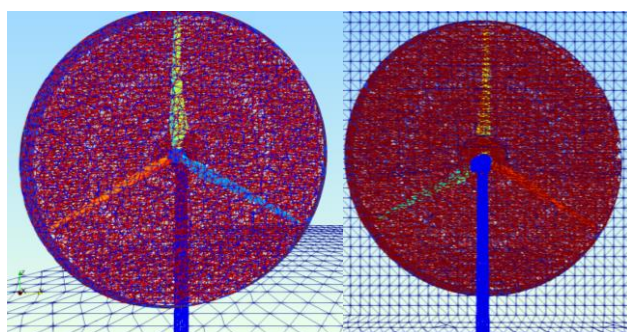
Сурет 4 – snappyHexMesh салғаннан кейін жел турбины және оның қалақтарының торының көрінісі

Transformpoints утилитасы фондық торды айналу осіне параллель ету үшін қолданылады. "rotate '(1 0 0) (0.993572 0 0.113203)'" қосқышы вектор (1 0 0) мен (0.993572 0 0.113203) вектор арасындағы айналу тұрғысынан түрлендіруді орнатады, мұнда бірінші вектор негізгі координаттар жүйесіндегі x осін, ал екінші вектор айналу осін білдіреді.

SnappyHexMeshDict конфигурация файлы қажетті параметрлерді орнату үшін пайдаланылды және 5 негізгі бөлімнен тұрды:

- geometry-геометрияның сипаттамасы;
- castellatedMeshControls-тордың беткі және көлемді қалыңдауы;
- snap-дененің бетіне жақын торды бақылау;
- addLayersControls-шекаралық қабаттарда тор ұяшықтарын басқару және құру;
- meshQualityMetrics-әртүрлі индикаторлар бойынша тор сапасын бақылау [5,6].

Торды құрудың негізгі процесі snappyHexMesh утилитасын қолдану арқылы жүзеге асырылады (сурет 4). SnappyHexMesh тордың параллель генерациясын аяқтаған кезде, торды параллель қайта құру қажет. ReconstructParMesh іске қосу арқылы параллель торды бір торға қайта жинақтауға болады. ToroSet көмегімен dynamicMesh үшін қажетті "ротор" аймағын жасайды, ротор аймағындағы қалақтар 5-суретте көрсетілген.



Сурет 5 – Алдыңғы және артқы ротор аймағы бар айналмалы бөлік торының түрі

Кесте 1 – Әр нақтылау деңгейіне арналған ұяшықтар:

0	1 123 283
1	94 658
2	437 049
3	1 310 681

Айналмалы бөліктің SnappyHexMesh деректері жабық тордың 2 965 671 ұяшықтан, 9 447 062 беттен және 3 623 151 нүктеден тұратынын көрсетеді. Бұл айналу аймағындағы турбулентті ағындарды модельдеу үшін жеткілікті жоғары ажыратымдылық. Ұяшықтарды нақтылау төрт деңгейге бөлінеді, ұяшықтардың көпшілігі үшінші деңгейде (кесте 1). Бұл тордың айналмалы бөліктің геометриясы мен динамикасына бейімделетінін көрсетеді.

Кеңістікті шектеу: (-400000 – 128000 – 47500) (80000 128000 144500)

Нүктелер саны: 746 091

Ұяшықтар саны: 720 000

Тараптар саны: 2 185 800

Ішкі қырлары: 2 134 200

Жел турбинының айналмайтын бөлігінің салынған торы туралы ақпарат оның ажыратымдылығы мен сапасы жеткілікті екенін көрсетеді (сурет 6). Тор турбинаның нақты өлшемдеріне сәйкес келетін кеңістіктің үлкен көлемін қамтиды. Тордың нүктелері мен ұяшықтарының саны турбинаның айналасындағы ауа ағынының дәл модельдеуін қамтамасыз ету үшін жеткілікті үлкен. Тордың бүйірлері мен ішкі беттерінің саны тордың жақсы тегістелгенін және өткір бұрыштары немесе қисықтары жоқ екенін көрсетеді. Жалпы, жел турбинының айналмайтын бөлігінің тор деректері оның жоғары сапасы мен одан әрі талдауға жарамдылығын көрсетеді (кесте 2, 3, 4).

Кесте 2 – Тор статистикасы:

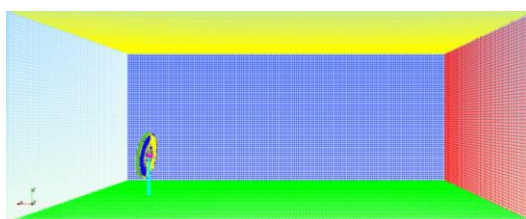
Нүктелер	16 319 504
Қырлар	46 933 018
Ішкі қырлар	46 158 476
Ұяшық	15 357 927
Ұяшыққа арналған қырлар	6.06 146
Шекаралық аймақ	30
Нүктелік аймақ	0
Қырлар аймағы	0
Ұяшықтар	2

Кесте 3 – Қорытынды тордағы әр типтегі ұяшықтардың жалпы саны:

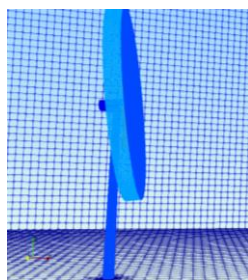
Алты қырлы	14 676 878
Призма	103 015
Сыналар	0
Пирамидалар	0
Тет сыналар	170
Тетраздрлар	0
Көп қырлылар	577 864

Кесте 4 – Беттер саны бойынша полиэдрлердің бөліну деректері:

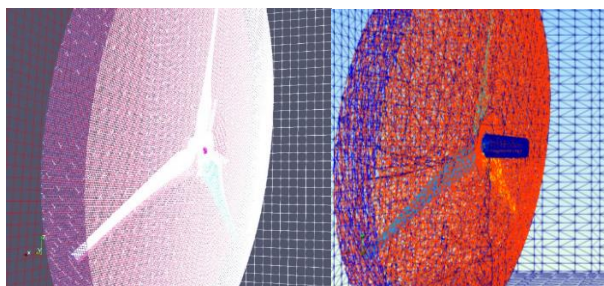
Қырлар	Ұяшық саны
4	99 142
5	65 498
6	124 173
7	27
8	13
9	176 753
10	4
11	12
12	76 750
13	2
15	35 237
16	1
17	252
18	12
19	76 750



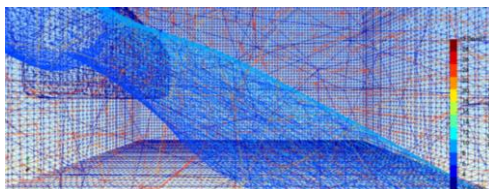
Сурет 6 – Кеңістіктік аймақтың айналмайтын бөлігінің торы



Сурет 7 – blocMesh салған айналмалы емес бөлік торы



Сурет 8 – Біріктірілген торлар



Сурет 9 – Жел турбинасының біріктірілген торы

Айналмалы және айналмайтын бөлікті біреуге біріктіру `mergeMeshes` утилитасымен іске асады (сурет 7). `CreatePatch` командасы әр жағдайда үш кішігірім патчтан 'rotBox1-outlet' және 'rotBox2-outlet' патчтарын жасайды (сурет 8). `ChangeDictionary` утилитасы сәйкес келмейтін интерфейстерде ағын өрісінің айнымалыларын біркелкі көрсету үшін `cyclicami` шекара түрін дұрыс орнатады [7,8]. Турбинана қалағының торы 9 суретте көрсетілген. Әрі қарай, `transformPoints` утилитасы соңғы торды миллиметрден метрге дейін масштабтау үшін қолданылады, өйткені OpenFOAM үшін СИ бірліктерін пайдалануы керек.

Қорытынды

Мақалада алынған эксперимент нәтижелері OpenFoam пакетін пайдаланып стационарлық емес ауа ағынымен көлденең үш қалақты жел турбинасын 3D модельдеу үшін тор салу әдісінің тиімділігін көрсетеді. BlockMesh көмегімен құрылымдық алтыбұрышты ұяшық торын құру, snappyHexMesh көмегімен торды қалақ геометриясына бейімдеу және турбинаның қозғалыс динамикасын есепке алу үшін торды екіге бөлу сияқты торды құрудың негізгі кезеңдері қарастырылды. SnappyHexMesh-ті беттердің жақсы сәйкестігін және қабат шекарасының жеткілікті ажыратымдылығын қамтамасыз ететін сапалы торды алу үшін пайдаланудың артықшылықтары көрсетілді. Модельдеу нәтижелері ұсынылған тор салу әдісі тиімді екенін және жел турбиналарының айналуына қатысты мәселелердің кең класын шешуге жарамды екенін көрсетті.

Әдебиеттер тізімі

1. Christopher J. Greenshields, «CFD Direct Ltd. User Guide» version 5.0. <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11/index> (2017).
2. Greenshields, C. «Openfoam — 2.2.0: snappyhexmesh _ feature snapping». <https://openfoam.org/release/2-2-0/snappyhexmesh-features-layers-baffles/> (2013).
3. Greenshields C. «Openfoam – 2.3.0: Arbitrary mesh interface». <https://openfoam.org/release/2-3-0/non-conforming-ami/> (2014).
4. Hoem M.E., Jun. «Implentation and testing of an actuator disk in openfoam». Project work, The Norwegian University of Science and Technology. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22196-6_48 (2017).
5. Holzmann, T., «Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM», 4th Edition. Holzmann CFD. https://www.academia.edu/37043744/MATHEMATICS_NUMERICS_DERIVATIONS_AND_OPENFOAM (2016).
6. Lloyd C. Sampling for graphs in parallel for ami case. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2514.2515> (2017).

7. Stergiannis N. Cfd modeling approaches against single wind turbine wake measurements using rans / N. Stergiannis, C. Lacor, J.V. Beeck, R. Donnelly // Journal of Physics: Conference Series 753. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24976.81928> (2016).
8. Stergiannis N. Full hawt rotor cfd simulations using different rans turbulence models compared with actuator disk and experimental measurements / N. Stergiannis, J. van Beeck, M.C. Runacres // Wind Energy Science Discussions. P. 1-20. <http://dx.doi.org/10.5194/wes-2017-6> (2017).
9. Modelling of wind turbine wake with a sliding mesh / J. van der Auweraert // Master's thesis, Delft University of Technology. <http://dx.doi.org/10.1002/we.2821> (2015).
10. Christopher J. Greenshields, «CFD Direct Ltd. User Guide version 5.0». <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11/index> (2017).
11. Bartl J. Blind test comparison of the performance and wake flow between two in-line wind turbines exposed to different turbulent inflow conditions / J. Bartl, L. Scetran // Wind Energy Science 2. – P. 55-76 <http://dx.doi.org/10.5194/wes-2-55-2017> (2017).
12. Barthl J., Sætran L., Invitation to the 2015 «Blind Test 4» Workshop Combined power of two in-line turbines at different inflow conditions. Research Gate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1749.2004> (2015).
13. Numerical simulations on static Vertical Axis Wind Turbine blade icing // R. Manatbayev et al // Renewable Energy. 2021. – № 170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.023>.
14. Zhang Y. Assessment of Applicability of Auto-Generated Grid in Large Eddy Simulation of Flow Around a Cylinder / Y. Zhang et al // Journal of Tongji University. – 2023. № 51(4). P. 542-550. <http://dx.doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.21518>.
15. Venugopalan S.G.R. A Parallel Implementation of blockMesh for Quick Generation of Huge Meshes / S.G.R. Venugopalan, D. Chandar, H. Gopalan // Conference: ESI OpenFOAM User Conference, https://www.researchgate.net/publication/328577387_A_Parallel_Implementation_of_blockMesh_for_Quick_Generation_of_Huge_Meshes.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетін қаржыландыру шеңберінде орындалды (ЖРН – АР14870834).

A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, V.Y. Maksimov, E. Medetuly*

Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 al-Farabi Ave.

*e-mail: medetuli_ernar@mail.ru

FEATURES OF BUILDING A GRID FOR 3D MODELING OF A WIND TURBINE

The article deals with the problem of constructing a grid for 3D modeling of a wind turbine by a non-stationary air flow. To solve the problem, two grids are constructed: the first from the rotating part, the second from the non-rotating part. Consequently, blockMesh, snappyHexMesh, TransformPoint, reconstructParMesh, mergeMeshes, changeDictionary utilities are used to build the grid as part of the OpenFOAM package. The solution of the main problems in the construction of the grid is determined: the first is a combination of static and moving grid, the second axis of rotation is not parallel to any of the main axes (this fact complicates the engagement with the help of snappyHexMesh and torque estimation).

As a result of the data obtained from the constructed grids, the stationary part covers a large amount of space and has a high resolution. For example, the grid of the stationary part constructed with blockMesh consists of 6,750,000 cells, the total number of sides of the grid is 20,385,000, of which 20,115,000 are internal faces, and the rest are the boundaries of the grid. The data of the rotating part shows that the closed grid consists of 2,965,671 cells, 9,447,062 faces and 3,623,151 points. Consequently, the rotating part adapts to the geometry and dynamics of the turbine blades. Based on the data obtained from the constructed grids, the quality and resolution of the grid are analyzed. It is shown that the resulting grid has sufficient accuracy and adaptability to simulate turbulent flows around a wind turbine.

Key words: grid; solver; wind turbine; utilities; algorithm.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СЕТКИ ДЛЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ

В статье рассматривается задача о построении сетки для 3D моделировании ветряной турбины нестационарным потоком воздуха. Для решения задачи строится две сетки: первая из вращающейся части, вторая из не вращающейся части. Следовательно, для построения сетки используются утилиты blockMesh, snappyHexMesh, transformPoint, reconstructParMesh, mergeMeshes, changeDictionary в составе пакета OpenFOAM. Определяется решение основных проблем при построении сетки: первая это комбинация статической и движущейся сетки, вторая ось вращения не параллельна ни одной из основных осей (этот факт усложняет зацепление с помощью snappyHexMesh и оценку крутящего момента).

В результате полученных данных из построенных сеток стационарная часть охватывает большой объем пространства и имеет высокое разрешение. Например, сетка стационарной части построенная с blockMesh состоит из 6 750 000 ячеек, суммарное число сторон сетки равно 20 385 000, из которых 20 115 000 являются внутренними гранями, а остальные границами сетки. Данные вращающейся части показывают, что замкнутая сетка состоит из 2 965 671 ячеек, 9 447 062 граней и 3 623 151 точек. Следовательно, вращающаяся часть адаптируется к геометрии и динамике лопастей турбины. Исходя из данных полученных построенных сеток анализируется качество и разрешение сетки. Показано, что полученная сетка имеет достаточную точность и адаптивность для моделирования турбулентных потоков вокруг ветряной турбины.

Ключевые слова: сетка; решатель; ветряная турбина; утилиты; алгоритм.

Авторлар туралы мәліметтер

Алия Сандыбаевна Аскарова – профессор, физика-математика ғылымдарының докторы, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, физика-техникалық факультеті, жылуфизика және техникалық физика кафедрасы, Алматы қаласы; e-mail: Aliya.Askarova@kaznu.kz.

Салтанат Алихановна Болегенова – профессор, физика-математика ғылымдарының докторы, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, физика-техникалық факультеті, жылуфизика және техникалық физика кафедрасы, Алматы қаласы; e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz.

Валерий Юрьевич Максимов – PhD, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, физика-техникалық факультеті, жылуфизика және техникалық физика кафедрасы, Алматы қаласы; e-mail: Valeriy.Maximov@kaznu.kz.

Ернар Медетулы* – магистрант, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, физика-техникалық факультеті, жылуфизика және техникалық физика кафедрасы, Алматы қаласы; e-mail: medetuli_ernar@mail.ru.

Сведения об авторах

Алия Сандыбаевна Аскарова – профессор, доктор физико-математических наук, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы; e-mail: Aliya.Askarova@kaznu.kz.

Салтанат Алихановна Болегенова – профессор, доктор физико-математических наук, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы; e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz.

Валерий Юрьевич Максимов – PhD, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы; e-mail: Valeriy.Maximov@kaznu.kz.

Ернар Медетулы* – магистрант, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, г. Алматы; e-mail: medetuli_ernar@mail.ru

Information about the authors

Alya Sandybaevna Askarova – Professor, Doctor of Physics and Mathematics, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Thermophysics and Technical Physics Department, Almaty; e-mail: Aliya.Askarova@kaznu.kz.

Saltanat Alihanovna Bolegenova – Professor, Doctor of Physics and Mathematics, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Thermophysics and Technical Physics Department, Almaty; e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

Valery Yuiyovich Maximov – PhD, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Thermophysics and Technical Physics Department, Almaty; e-mail: Valeriy.Maximov@kaznu.kz

Ernar Medetuly – master student, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Thermophysics and Technical Physics Department, Almaty; e-mail: medetuli_ernar@mail.ru.

Редакцияға енуі 27.03.2024

Өңдеуден кейін түсуі 29.04.2024

Жариялауға қабылданды 02.05.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-44



MPHTI: 55.22.23

Н. Серікбекұлы^{1,2*}, К.Д. Орманбеков^{1,2}, А.Б. Шынарбек^{1,2}, А.Ж. Жасулан^{1,2}

¹Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Научный центр «Модификация поверхности материалов»

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Физкультурная, 4в

*e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT1-0

Аннотация: В данной статье исследуется влияние электролитической среды на структуру и фазовый состав фосфатно-кальциевых покрытий, полученных микродуговым оксидированием поверхности титанового сплава BT1-0. Представлены экспериментальные исследования на основе различных электролитических сред (например, водного раствора нитрата кальция и водного раствора фосфата аммония). Фазовый состав и морфология покрытий были проанализированы с помощью микроскопии и рентгеновского дифракционного анализа. На основании исследований ученых в этой области удалось оценить влияние электролитической среды на формирование фосфатных кальциевых покрытий и определить оптимальную среду для достижения определенных свойств покрытий. В заключение следует отметить, что данная работа вносит вклад в понимание процесса формирования поверхностных покрытий на титановых сплавах и может способствовать дальнейшим исследованиям в области модификации поверхности материалов.

Ключевые слова: реакция, кислоты, электролитическая среда, кальций-фосфатные покрытия, микродуговое оксидирование.

Титан и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов благодаря своим свойствам, таким как коррозионная стойкость и высокая прочность.

Основной целью данной статьи является изучение структуры и фазового состава кальций-фосфатных покрытий на титановом сплаве BT1-0 в электролитически насыщенном и газонасыщенном состояниях при высокой температуре и высоком давлении.

Биосовместимые материалы и технологии их изготовления являются одним из ключевых направлений научно-производственного развития, что связано с потребностями практической медицины, нуждающейся в новом поколении имплантатов для восстановления и замещения биологической структуры и функции различных органов человеческого тела.

Покрытия из фосфата кальция, полученные методом микродугового оксидирования, могут быть использованы в нескольких областях на поверхности титановых сплавов BT1-0.