

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ZSHT7059>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.,

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә. Б. *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцен;</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

FTAMP 44.39.01

<https://doi.org/10.48081/RBOC1447>**А. С. Аскарова, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов,*****Е. Медетұлы***Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,**Қазақстан Республикасы, Алматы қ.***e-mail: medetuli_ernar@mail.ru*

ЖЕЛ ТУРБИНАСЫ АРҚЫЛЫ ӨТЕТІН ТУРБУЛЕНТТІ ТҰРАҚСЫЗ АҒЫНДЫ 3D МОДЕЛЬДЕУ

Қазба отындарының болжамды тапшылығына және олардың қоршаған ортаға теріс әсеріне байланысты қазіргі уақытта жаңартылатын көздерден энергия өндіру энергетика секторындағы негізгі бағыт болып табылады. Жел энергиясы-жасыл энергияның әлеуетті және тез өсіп келе жатқан көздерінің бірі. Бұл, атап айтқанда, соңғы екі онжылдықта жел энергиясын өндіру құны бес еседен астам төмендегендіктен. Бұл зерттеу OpenFoam бағдарламалық пакетін қолдана отырып, көлденең осьті жел турбинасын теориялық және есептеу арқылы модельдеуге бағытталған. CFD сандық модельдеу әдістерін қолдану жел турбинасының өнімділігін 10 м/с жел жылдамдығында егжей-тегжейлі талдауға және бағалауға мүмкіндік берді. Навье-Стокс теңдеулер жүйесін шешуге негізделген динамиктер. Турбуленттік $k-\omega$ SST моделі арқылы математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Нәтижелердің дәлдігі мен сенімділігі үшін маңызды болып табылатын модельдеу торының ерекшеліктері де қарастырылады. Салынған торлардан алынған мәліметтердің нәтижесінде стационарлық бөлік кеңістіктің үлкен көлемін қамтиды және жоғары ажыратымдылыққа ие. Мысалы, бекітілген бөліктің торы blockmesh көмегімен салынған 12 421 326 ұяшықтан тұрады. Осылайша, жел турбиналарын өндіру басталғанға дейін олардың тиімділігін бағалау үшін модельдеу

олардың өнімділігін арттыруға және электр энергиясын өндіру процесін оңтайландыруға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: 3D модельдеу, жел турбины, тұрақсыз, тор, шешуші, утилиталар.

Кіріспе

Қазақстанда энергияны жоғары тұтыну және жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) қарқынды дамытудың жаһандық процестеріне тарту жағдайында жел энергетикасы саласы өте өзекті болып отыр. Жел энергиясы-ең қарқынды дамып келе жатқан жаңартылатын энергия көздерінің бірі. Жел энергиясының артықшылықтары мен елдің энергетикалық қауіпсіздігіне қосқан үлесі арқасында жаңартылатын энергияның бұл түрі кеңінен енгізілуде. Жел ресурстары Қазақстан аумағында кең таралған. Сонымен қатар, электр энергиясын алыс қашықтыққа беру ескірген инфрақұрылым мен ұрлық салдарынан болған шығындарға байланысты тиімсіз. Демек, жел энергиясын пайдалану көмір және газ электр станциялары өндіретін электр энергиясын беру құнымен салыстырғанда экономикалық тұрғыдан тиімді. Экономикалық тұрғыдан алғанда, ұзақ мерзімді перспективада жел әлеуеті жоғары аудандарда жел электр станцияларының құрылысы жаңа көмір электр станциясының құрылысымен және энергия беруімен салыстырылады. Жел энергетикасының экологиялық аспектісіне келетін болсақ, жыл сайын сағатына 1,5 миллион МВт энергия өндіруге қабілетті 500 мегаватт (МВт) жел электр станциясын орнату 1,5 миллион тонна парниктік газдар, 12 мың тонна күкірт оксиді, 7,8 мың тонна азот оксиді, 12,6 мың тонна күл және 420 мың тонна қатты қалдықтардың шығарылуына жол бермейді.

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 қолданудың артықшылығы, ол әртүрлі

жағдайларда жүйенің мінез-құлқын талдауға және болжауға, тәжірибелер мен зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді, олар өмірде тым күрделі, қымбат немесе мүмкін емес болуы мүмкін зерттеулерді минималды шығынмен болжауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістер

Жел турбинасын модельдеу үшін CFD сандық шешу моделі қолданылады. CFD модельдеу (Computational Fluid Dynamics modeling) – физика-математикалық әдістерді қолдана отырып, ағындық процестердің сипаттамаларын есептеуге арналған үздіксіз механиканың бір саласы.

Қойылған мақсатқа жету үшін сандық есеппен модельдеу OpenFoam еркін таратылатын бағдарламалық жасақтамасы арқылы жасалады, ол модельденген объектінің айналасындағы ортаның әр түрлі сипаттамаларын алу үшін бірқатар мүмкіндіктерді ұсынады. C++ кодына негізделген OpenFoam кеңістіктегі жүйенің жеке туынды бойынша дифференциалдық теңдеулер жүйесін шешуге арналған құралдарды ұсынатын кітапханалар жиынтығына негізделген [1, 17-6.]. Жел турбинасының айналуын модельдеу үшін OpenFoam мен жұмыс істеу және оны шешілетін мәселеге бейімдеу келесідей орындалады:

Файлдар конфигурациясы орнатылады. OpenFoam қалталар мен конфигурациялық файлдардың белгілі бір иерархиясын қолданады, олардың орналасқан жері пакетте утилиталармен алдын-ала белгілі. Кейбірінде тор(mesh) – модельденген жағдайдың геометриясының сипаттамасы сақталады. Кейбіреулерінде-қолданылатын шешушінің параметрлері, қолданылатын интегралдау әдістері, ағын қозғалысының дифференциалдық теңдеулерін шешу, қоршаған ортаның сипаттамалары және т. б. Конфигурациялық файлдардың параметрлері OpenFoam-мен жұмыс істеудің ең қиын бөлігі болып табылады

Торды құру. Берілген файлдарға арналған арнайы утилиталардың көмегімен параметрлер тордың автоматтандырылған құрылысы жасалады. Сапалы торды құру қоршаған ортаны модельдеу нәтижесіне әсер ететін маңызды міндет болып табылады. OpenFoam өз есептеулерінде соңғы көлем әдісін қолданады. Торды модельдеу кеңістігі көптеген көлемдерге бөлінеді және әрбір осындай бөлік үшін біртекті құрамды ортаның бір бөлігі үшін есептеулер жасалады. Бұл дегеніміз, егер күрделі процестің нақты есептеулерін алу қажет болса, бұл жағдайда тор кішірек болуы керек.

Турбулентті ағын қозғалысын модельдеу. Ол үшін қол жетімді утилиталар жиынтығы шешушілер қолданылады. Модельдеу кезінде алдын ала белгіленген бастапқы шарттарға сүйене отырып, шешушіге салынған дифференциалдық теңдеулер шешіледі, сұйықтықтың әр соңғы көлеміндегі жылдамдығы, қысымы анықталады. Барлығы жинақталып конфигурация кезеңінде берілген ағын және объектімен ағынның өзара әрекеттесуі туралы мәліметтер-ақпарат мөлшері өткізгіш экспериментті реттейді. Конфигурациялық файлдарда орнатылған жиілікпен әрбір соңғы көлем туралы барлық қажетті деректер жеке файлдарға жиналады.

Кейінгі өңдеу. OpenFoam-да алынған деректерді өңдеуге мүмкіндік беретін көптеген утилиталар бар, минимумдарды табу, орташалау және т. б. алынған эксперименттерді көру үшін Paraview пакеті қолданылады, оның көмегімен әртүрлі графиктер құра аласыз және объектінің айналасындағы ағындарды, қысымның таралуын, жылдамдықты және олардың құрамдас бөліктерін. Сондай-ақ, нәтижелерді әр түрлі форматта жазу мүмкіндігі бар-суреттерді сақтаудан бастап анимацияларды жазуға дейін.

Модельдің физикалық шешуші теңдеуі

Шешуші теңдеу соңғы көлем әдісі немесе дискретизация әдісі атауымен белгілі. Навье-Стокс теңдеуі интегралды түрде

$$\oint (\rho \mathbf{f} \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \Gamma \frac{d\phi}{dx} dA + \int S(\phi) dV \quad (1)$$

мұндағы бірінші мүше-конвекция мүшесі, екіншісі-диффузия мүшесі, ал үшіншісі-көздің мүшесі. Беттік интегралды көлемдік интегралға айналдыру үшін Гаусс теоремасын қолдана отырып және ағынның векторлық функциясы тегіс деп есептей отырып, дифференциалдық формадағы теңдеуді тұрақты бір өлшемді конвекция мен диффузия теңдеуіне айналдыруға болады:

$$\frac{d}{dx} (\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S(\phi) \quad (2)$$

үздіксіздік теңдеуін қанағаттандыруы керек $\nabla \cdot (\rho u A) = 0$. Тасымалдау теңдеуін интегралдау келесідей өрнекті береді:

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_\omega = (\Gamma A \frac{d\phi}{dx})_e - (\Gamma A \frac{d\phi}{dx})_\omega + \bar{S} V_P \quad (3)$$

мұндағы $\bar{S}$ – бастапқы мүшенің орташа мәні, V_P – көлем, а P және Γ – диффузия коэффициенті.

Конвективті ағынды F және диффузиялық өтімділігін D тапсақ

$$F_e = (\rho u)_e \text{ и } D_e = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_\omega \quad (4)$$

және ϕ_e болса

$$\frac{d\phi_e}{dx} \approx \frac{\Delta\phi_e}{\delta x_{PE}} = \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \quad (5)$$

Батыс бетімен байланысты жағдайлар да осылай бағаланады.

$A_e = A_\omega = A$ деп болжау жасасақ, онда (3) өрнект келесі түрде жазуға болады:

$$F_e \phi_e - F_\omega \phi_\omega = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_\omega (\phi_P - \phi_W) + S_u + S_P \phi_P \quad (6)$$

Мұнда бастапқы мүше біртекті бөліктен S_u , және біртекті емес бөліктен $S_P \phi_P$ тұрады деп жуықталған. Үзіліссіздік теңдеуі $F_e - F_\omega = 0$ болатынын береді.

Қолданылатын турбуленттік k- ω SST моделі

SST қысымды тасымалдауды білдіреді. k- ω SST моделі шекара үшін және қабаттар қысыммен бөлінген кезде де қабырғалар бойымен жақсы жұмыс істейді [6, 2-б.]. Шекаралық шарттарына келгенде, бұл модель k- ω сияқты сезімтал емес. Осылайша, бұл байланыс аэродинамика мәселелерін шешу үшін пайдалы. Бұл модель k- ϵ және k- ω моделінің біріккен моделі болып табылады, k- ϵ бетінен алыс жерде, ал k- ω шекаралық қабатта қолданылады. ω параметрі - турбуленттілік жиілігі [4].

Моделі келесі тасымалдау теңдеулерінен тұрады [7, 837-б.]:

$$\begin{aligned} & \partial p k / \partial t + (\partial p U_j k) / (\partial x_j) \\ & = (P_k) - \beta^* \rho \omega k + \partial / (\partial x_j) (\Gamma_k \partial k / (\partial x_j)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8)$$

Онда

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t \sigma_k \quad (9)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \mu_t \sigma_\omega \quad (10)$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

$$\widetilde{P}_k = \min(P_k; c_1 \epsilon) \quad (12)$$

$$\mu_t = \rho v_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; S_{F_2})} \quad (13)$$

Демек, араласу функциясы F' келесі түрде

$$F_1 = \tanh \left(\left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 v}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right) \quad (14)$$

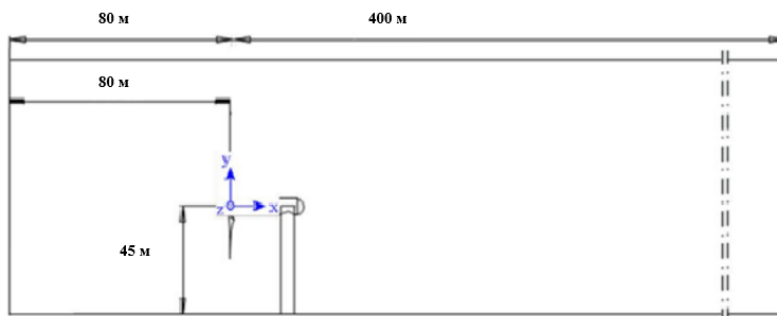
$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$ мұндағы у-жақын қабырғаға дейінгі арақашықтық. Бірінші араласу функциясы ішінде қолданылатын екінші араласу функциясы F_2 , келесідей

$$F_2 = \tanh \left(\left(\max \left[\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 v}{y^2 \omega} \right] \right)^2 \right) \quad (15)$$

Торды құру

Торды құру кезінде stl-файл форматында дайын жел турбинасының геометриялары пайдаланылды (Сурет 2). Жел турбинасының кеңістіктік

аймағы тікбұрышты аймақ болды (Сурет 1). Жел турбинасы айналмалы қалақтардан және айналмайтын гондоладан, хабтан, мұнарадан тұрады.



Сурет 1 – Жел турбинаны орнату эскизі

Тор айналмалы және айналмайтын екі бөліктен тұрады. Модельдеу үшін тор құру бірнеше кезеңнен тұрады. Бірінші кезең айналмалы бөліктің фондық торын құру blockmesh (негізгі X, Y, Z осьтеріне тураланған тіктөртбұрыш) [9, 10-б.]. Екіншіден, торды құрудың негізгі процесі snappyhexmesh утилитасын қолдану арқылы жүзеге асырылады. Ұқсас командалар айналмалы бөліктің торын құру үшін орындалады. Үшінші кезең айналмалы және айналмайтын бөлікті біріктіру merge meshes утилитасы арқылы жүзеге асырылады [1, 158-б., 2; 1-б.].

Айналмалы бөліктің snappyhexmesh деректері жабық тордың 12 421 326 ұяшықтан, 37 566 508 беттен және 12 726 390 нүктеден (4-сурет) тұратынын көрсетеді. Бұл айналу аймағындағы турбулентті ағындарды модельдеу үшін жеткілікті жоғары ажыратымдылық. Ұяшықтар нақтылаудың төрт деңгейіне бөлінеді, ұяшықтардың көпшілігі үшінші деңгейде. Бұл тордың айналмалы бөліктің геометриясы мен динамикасына бейімделетінін көрсетеді [3].

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

Нүктелер саны: 12 726 390

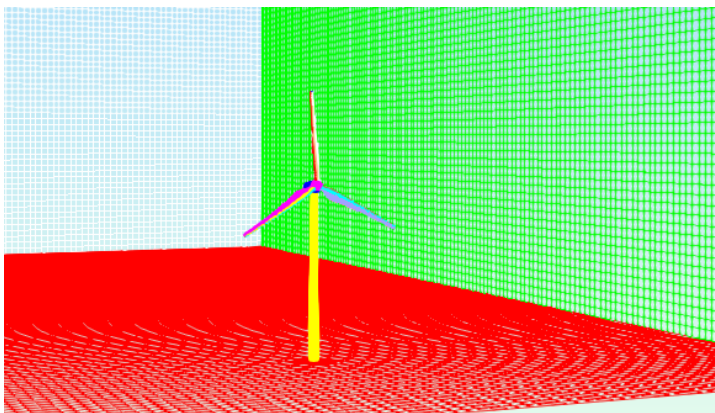
Ұяшықтар саны: 12 421 326

Қырлары: 37 566 508

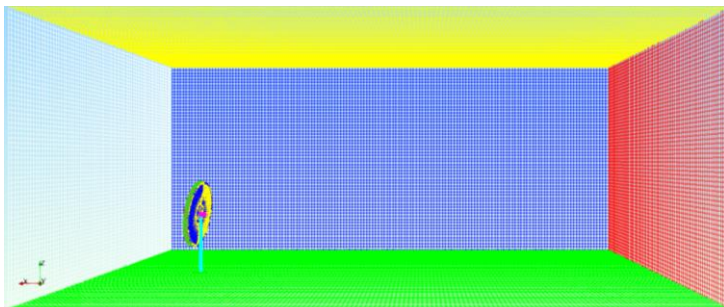
Ішкі қырлары: 37 371 557

Жел турбинасының айналмайтын бөлігінің салынған торының ақпараты оның ажыратымдылығы мен сапасы жеткілікті екенін көрсетеді

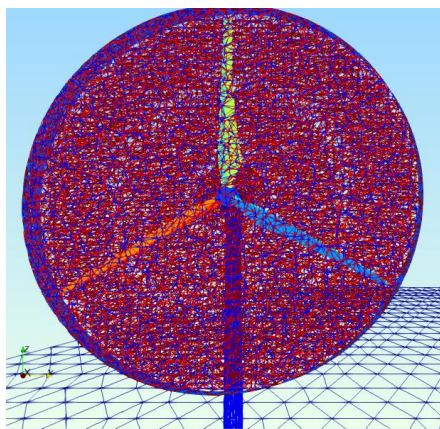
(Сурет 3). Тор турбинаның нақты өлшемдеріне сәйкес келетін кеңістіктің үлкен көлемін қамтиды. Әдетте модельдеу кезінде қалақшалар модельдеудегі ұяшықты өткізіп алмауы үшін уақыт қадамы шектеулі екенін есте ұстаған жөн. Жылжымалы тор бұл шектеуден зардап шекпейді, тіпті кейбір іске асыруларда жылжымалы тор интерфейсінде бір уақыт аралығында рұқсат етілген айналу шегі болса да, мұндай аймақ қалақшаларға қарағанда әлдеқайда өрескел ажыратымдылыққа ие болуы мүмкін [8, 13-б.]. 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 (Сурет 4). Жалпы, жел турбинасының айнамайтын бөлігінің тор деректері оның жоғары сапасы мен одан әрі талдауға жарамдылығын көрсетеді [3].



Сурет 2 – Жел турбинасының моделі



Сурет 3 – Кеңістіктік аймақтың айналмайтын бөлігінің торы

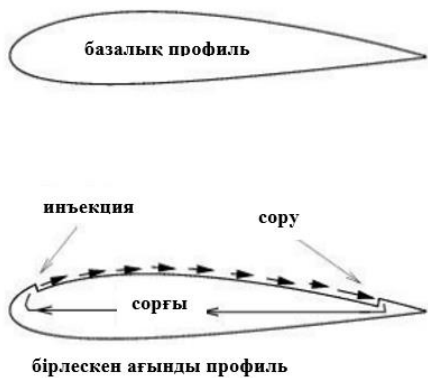


Сурет 4 – Алдыңғы ротор аймағы бар айналмалы бөлік торының түрі

Нәтижелер мен талқылаулар

Осы зерттеу аясында CFD есептеулеріне арналған OpenFoam бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, көлденең жел турбинасын сандық модельдеу жүргізілді. Жобаланған жел турбинасы ротордың диаметрі 50 м, биіктігі 45 м. Сандық модельдеу өлшемдері 480м x 256м x 192м болатын тікбұрышты кеңістікте жүргізілді. Модельдеудің негізгі сипаттамалары ауа ағынының жылдамдығы 10м/с, тұтқырлығы $\mu = 1,831 \cdot 10^{-5}$ Па·с, ротордың айналу жиілігі 1,57 рад/с немесе 15 RPM. Шешуші ретінде PISO алгоритмі (сурет 5) қолданылды. Сандық модельдеу үшін жалпы CFJ6421 қалақ профилі (Co-Flow Jet) таңдалды. CFJ аэродинамикалық профилінде энергия шығынын азайтудың бірегей механизмі бар, өйткені реактивті ағын алдыңғы жиектегі максималды сору

орнына енгізіледі, мұнда негізгі ағынның қысымы ең төмен және ағынның шығуын жеңілдетеді және негізгі ағынның қысымы ең жоғары және ағынды оңай бұруға мүмкіндік беретін артқы жиекке жақын сорылады(Сурет 5, 6) [11, 6-б.].



Сурет 5 – Базалық және CFJ Бірлескен ағынды профиль [11, 6-б.]



Сурет 6 – CFJ профильдің геометриялық эскизі

```

forces turbine-forces-and-moments write:
  sum of forces:
    pressure : (-32357.9 -45.5196 -1769.7)
    viscous   : (-70.2715 -0.321715 1.07794)
    porous    : (0 0 0)
  sum of moments:
    pressure : (313127 -1299.03 48751.9)
    viscous   : (-347.913 -6.20376 -58.6716)
    porous    : (0 0 0)

Time = 0.01203

Courant Number mean: 3.58718e-05 max: 0.0521014
smoothSolver: Solving for Ux, Initial residual = 1.68842e-07, Final residual = 3.62267e-12, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for Uy, Initial residual = 2.70342e-05, Final residual = 9.80802e-10, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for Uz, Initial residual = 7.57393e-07, Final residual = 3.18641e-11, No Iterations 1
GAMG: Solving for p, Initial residual = 0.008222688, Final residual = 8.17681e-06, No Iterations 2
time step continuity errors: sum local = 5.68337e-17, global = -2.37674e-20, cumulative = -4.74878e-19
GAMG: Solving for p, Initial residual = 3.57845e-05, Final residual = 1.70855e-06, No Iterations 3
time step continuity errors: sum local = 1.1707e-17, global = -7.72429e-20, cumulative = -5.5212e-19
GAMG: Solving for p, Initial residual = 1.02315e-05, Final residual = 7.62728e-07, No Iterations 2
time step continuity errors: sum local = 5.22619e-18, global = -3.258e-20, cumulative = -5.847e-19
smoothSolver: Solving for nuTilda, Initial residual = 7.50467e-06, Final residual = 1.7234e-11, No Iterations 1
ExecutionTime = 204.07 s. ClockTime = 336 s

```

Сурет 5 – PISO алгоритмі есептеу барысы

Есептеулер Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ университетіндегі жылу физикасы және техникалық физика кафедрасының жылу массасын тасымалдау процестерін модельдеу зертханасында орындалды. Есептеулер кезінде PISO шешушісі берілген уақыт қадамымен файлға әрбір қадамы үшін жазылады. Процесс әр процессорда параллель шешілгендіктен, әр процессор үшін жеке папка жасалады және соңында барлық нәтижелер `decomposePar` көмегімен уақыт бойынша бірыңғай деректерге біріктіріледі[5, 341-6].

Күш моменті бойынша есептелген қуат келесі (1) формуламен есептеледі:

$$P = \tau \cdot \omega \quad (1)$$

Турбина қуатын есептеуді тексеруге арналған теориялық формула (2).

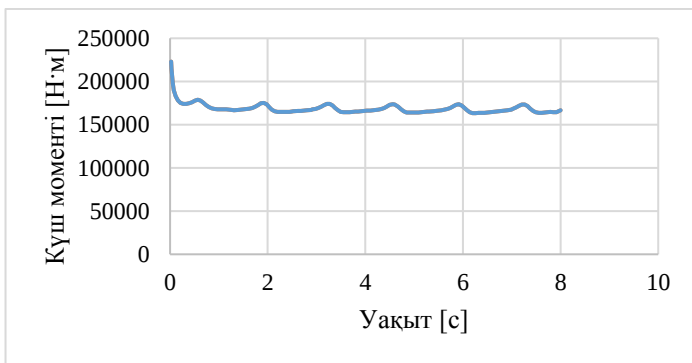
$$P = \frac{\rho S V^3 \eta_\eta \eta_\mu}{2} \quad (2)$$

мұндағы: ρ – ауа тығыздығы, S – қалақшалар айналу ауданы, V – жел жылдамдығы, η_η – турбина коэффициенті, η_μ – жел генератор коэффициенті

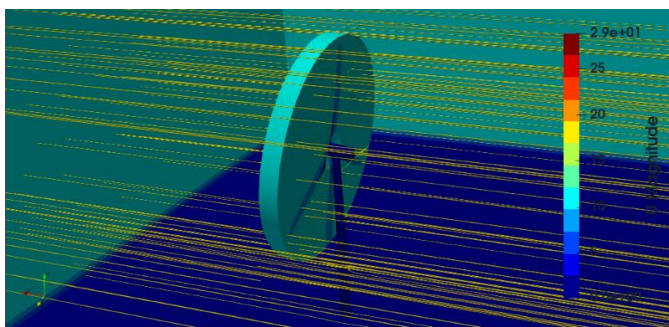
$$P = \frac{1,23 \cdot 1962,5 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot 0,7}{2} \approx 337 \text{ кВт}$$

(2)-ші формула бойынша қуат 337 кВт. Осыдан практикалық мәліметтердің теориялық мәліметтерден ауытқуы шамамен 18 % құрайды.

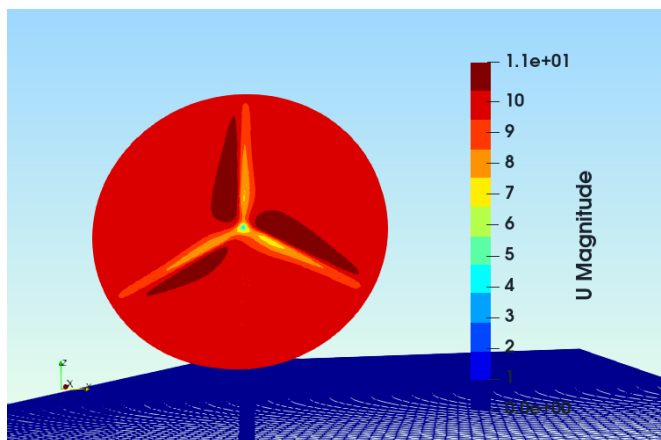
N жел турбинасының болжамды қуаты 236 кВт құрады. Алынған жел турбинасының айналу моментінің кестесі белгілі бір жұмыс жағдайында турбина 175 000 Н·м (Сурет 6) айналу моментінің шыңына жетуге қабілетті екенін көрсетеді. Бұл желдің кинетикалық энергиясын механикалық энергияға түрлендіру кезінде құрылғының жоғары тиімділігін көрсетеді. Айналу моменттің графигі максималды мәніне ротордың белгілі бір айналу жылдамдығымен қол жеткізілетінін көрсетеді, содан кейін желдің жылдамдығы жоғарылаған кезде де момент тұрақтанады. 7,8 суретте турбина бойынша ауа ағынының таралуы көрсетілген.



Сурет 6 – Уақыт бойынша күш моменті өзгерісі

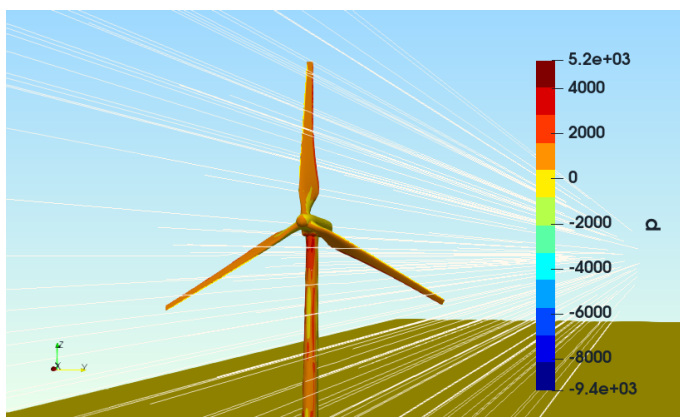


Сурет 7 – Ротормен жылдамдық ағыны

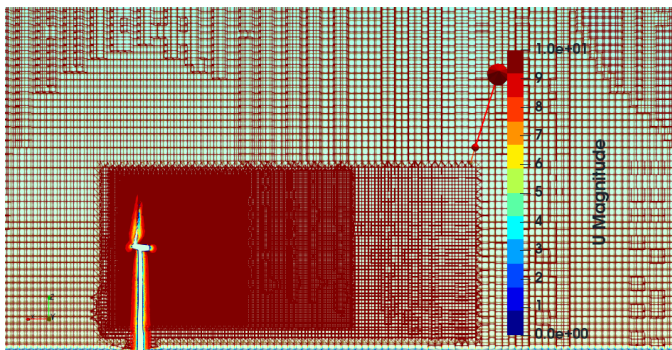


Сурет 8 – Жел турбинасына U ағын жылдамдығының әсері

Желдің төмен жылдамдығында турбина өндіре алатын қуат шектеулі. Жел жылдамдығының жоғарылауымен қуат артады. Алайда, желдің шекті жылдамдығы деп аталатын белгілі бір жылдамдыққа жеткеннен кейін, жылдамдықтың одан әрі артуы турбина дизайнының шектеулеріне байланысты қуаттың өсуіне әкелмейді. Турбина қалақтарына жел ағыны жағынан қысымның әсерін 9-суретте және желдің құйындауын у осы бойынша 10-суретте көре аламыз.



Сурет 9 – Турбинада қысымның таралуы



Сурет10 – Жел турбинының артындағы ағынның u осінің қимасы бойынша өзгеруі

Қаржыландыру ақпараты

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетін қаржыландыру шеңберінде орындалды (ЖРН - AP14870834)

Қорытынды

CFD сандық модельдеуді шешу үшін турбины бар көлденең орнату жобасы орындалды. Жел турбины өзінің максималды қуатына тұрақты жел жылдамдығында 10 м/с жетеді. Жел турбины басқа жел жылдамдығында максимумға жетеді, содан кейін ол жылдамдық жеткенше максималды қуатты сақтай алады. Ұсынылған құрылымның максималды болжамды қуаты–236 кВт. Желдің жылдамдығы шығыс қуатын арттыратындықтан, қалақтардың көлбеу бұрышы ұлғайған сайын шығыс қуаты азаяды. CFD нәтижелері дизайн үшін ең жоғары момент 175 000 Н·м екенін көрсетті. Әдетте, осы типтегі модельдерді электр энергиясын өндірудің оңтайлы өнімділігіне қол жеткізу үшін жел турбиналарының жұмыс жағдайларының кең ауқымындағы өнімділігін бағалау үшін пайдалануға болады. Алынған практикалық сандық 3D модельдеу мәліметтердің теориялық мәліметтерден ауытқуы шамамен 18 % құрады.

Мақалада алынған эксперимент нәтижелері OpenFoam пакетін пайдаланып стационарлық емес ауа ағынымен көлденең үш қалақты жел турбинысын 3D модельдеу үшін тор салу әдісінің тиімділігін көрсетеді.

REFERENCES

- 1 **Christopher J. G.** CFD Direct Ltd. User Guide // Version 5.0. 2017. P. 20–77. <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11/index>.
- 2 **Greenshields, C.** Openfoam – 2.2.0: snappyhexmesh _ feature snapping // 2013. <https://openfoam.org/release/2-2-0/snappyhexmesh-features-layers-baffles/>.
- 3 **Greenshields, C.** Openfoam - 2.3.0: Arbitrary mesh interface // 2014. <https://openfoam.org/release/2-3-0/non-conforming-ami/>.
- 4 **Hoem, M. E.** Implentation and testing of an actuator disk in openfoam // Project work. // The Norwegian University of Science and Technology. – 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22196-6_48.
- 5 **Lloyd, C.** Sampling for graphs in parallel for ami case // ACM Computing Surveys // 2017. Volume 16. Issue 3. P 319-348. <https://doi.org/10.10145/2514.2515>.
- 6 **Stergiannis, N., Lacor, C., Beeck, J. V., Donnelly, R.** Cfd modeling approaches against single wind turbine wake measurements using rans // Journal of Physics: Conference Series 753. 2016 June – №3 <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24976.81928>.
- 7 **Uchida, T.** CFD Prediction of the Airflow at a Large-Scale Wind Farm above a Steep, Three-Dimensional Escarpmen // Energy and Power Engineering. 2017. – №9. – P. 829-842. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.913052>.
- 8 **Van der Auweraert, J.** Modelling of wind turbine wake with a sliding mesh // Master's thesis. Delft University of Technology. 2015. P. 5–15. <https://doi.org/10.1002/we.2821>.
- 9 **Venugopalan, S. G. R., Chandar, D., Gopalan, H.** A Parallel Implementation of blockMesh for Quick Generation of Huge Meshes // Conference: 6th ESI OpenFOAM. User Conference. 2018. https://www.researchgate.net/publication/328577387_A_Parallel_Implementation_of_blockMesh_for_Quick_Generation_of_Huge_Meshes.
- 10 **Yunchao Yang, Gecheng Zha.** Super-Lift Coefficient of Active Flow Control Airfoil: What is the Limit? // Conference: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – 2017. – P. 9964-9999. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1693>.

28.03.24 ж. баспаға түсті.

13.05.24 ж. түзетулерімен түсті.

02.06.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

A. S. Askarova, Bolegenova, V. Y. Maksimov, *E. Medetuly
Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 28.03.24.

Received in revised form 13.05.24.

Accepted for publication 02.06.24.

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

Due to the projected shortage of fossil fuels and their negative impact on the environment, energy production from renewable sources is currently the main focus in the energy sector. Wind energy is one of the potential and rapidly growing sources of green energy. This is, in particular, due to the fact that the cost of wind energy production has decreased by more than five times over the past two decades. This research aims to theoretically and computationally simulate a horizontal axis wind turbine using the OpenFoam software package. The use of CFD numerical modeling methods made it possible to perform a detailed analysis and assessment of the performance of a wind turbine at a wind speed of 10 m/s. A technique for studying the flow structure around a wind turbine using numerical methods of gas dynamics based on solving a system of Navier-Stokes equations is considered. Used mathematical modeling methods using the $k-\omega$ SST turbulence model. The features of the modeling grid, which are of key importance for the accuracy and reliability of the results, are also considered. Thus, modeling to evaluate the efficiency of wind turbines prior to their production helps to improve their performance and optimize the process of electricity generation.

Keywords: 3D modeling, wind turbine, unstable, grid, solver, utilities.

A. С. Аскарова, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов, *Е. Медетулы
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 28.03.24.

Поступило с исправлениями 13.05.24.

Принято в печать 02.06.24.

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ ТУРБУЛЕНТНЫМ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПОТОКОМ

В связи с прогнозируемым дефицитом ископаемых видов топлива и их негативным воздействием на окружающую среду, в настоящее время производство энергии из возобновляемых источников является основным направлением в энергетическом секторе. Энергия ветра является одним из потенциальных и быстро растущих источников зеленой энергии. Это, в частности, связано с тем, что стоимость производства энергии ветра за последние два десятилетия снизилась более чем в пять раз. Это исследование направлено на то, чтобы теоретически и вычислительно смоделировать ветроэнергетическую турбину с горизонтальной осью с использованием программного пакета OpenFoam. Использование методов численного моделирования CFD позволило выполнить детальный анализ и оценку производительности ветряной турбины при скорости ветра 10 м/с. Рассмотрена методика исследования структуры потока вокруг ветряной турбины с использованием численных методов газовой динамики, основанных на решении системы уравнений Навье-Стокса. Используются математические методы моделирования с помощью модели турбулентности $k-\omega$ SST. Также рассмотрены особенности сетки моделирования, которые имеют ключевое значение для точности и достоверности результатов. Таким образом, моделирование для оценки эффективности ветряных турбин до начала их производства, способствует повышению их эксплуатационных характеристик и оптимизации процесса выработки электроэнергии.

Ключевые слова: 3D моделирование, ветряная турбина, нестационарное, сетка, решатель, утилиты.

Теруге 03.06.2024 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4248

Сдано в набор 03.06.2024 г. Подписано в печать 28.06.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4248

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz