

ӨОЖ 691.328  
FTAXP 67.13.31, 67.11.29.

DOI 10.52578/2305-9397-2024-3-2-223-231

**Жусупбеков А.Ж.**, техника ғылымдарының докторы, профессор, негізгі автор, <https://orcid.org/0000-0003-2229-1059>

«Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана қаласы, Сәтпаев көшесі 2, 010008, Қазақстан, [askarkgs1955@gmail.com](mailto:askarkgs1955@gmail.com)

**Беристенов К. Б.**, магистрант, <https://orcid.org/0009-0002-8236-0028>

«Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КеАҚ, Орал қаласы, Жәңгір хан, 51, 090009, Қазақстан, [beristenov\\_k@mail.ru](mailto:beristenov_k@mail.ru)

**Днекешова Н. М.**, магистрант, <https://orcid.org/0009-0008-8118-4134>

«Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КеАҚ, Орал қаласы, Жәңгір хан, 51, 090009, Қазақстан, [nuria-dnekeshova@mail.ru](mailto:nuria-dnekeshova@mail.ru)

**Zhussupbekov A.Zh.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, the main author, <https://orcid.org/0000-0003-2229-1059>

NJSC «Eurasian National University named L.N. Gumilyov», Astana city, st. Satpayev 2, 010008, Kazakhstan, [askarkgs1955@gmail.com](mailto:askarkgs1955@gmail.com)

**Beristenov K. B.**, master's student, <https://orcid.org/0009-0002-8236-0028>

NJSC «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir khan», Uralsk, st. Zhangir khan 51, 090009, Kazakhstan, [beristenov\\_k@mail.ru](mailto:beristenov_k@mail.ru)

**Dnekeshova N. M.**, master's student, <https://orcid.org/0009-0008-8118-4134>

NJSC «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir khan», Uralsk, st. Zhangir khan 51, 090009, Kazakhstan, [nuria-dnekeshova@mail.ru](mailto:nuria-dnekeshova@mail.ru)

**ЖЕЛ ЖӘНЕ ДИНАМИКАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕЛЕРДІ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ЖЕЛ  
ТУРБОГЕНЕРАТОРЛАРЫНЫҢ ІРГЕТАСЫН ЕСЕПТЕУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ  
CALCULATION OF THE FOUNDATION OF WIND TURBINE GENERATORS, TAKING  
INTO ACCOUNT WIND AND DYNAMIC LOADS**

**Аннотация**

Бұл ғылыми мақалада қуаты 4,8 МВт жел турбинасы іргетасының жер төсемімен динамикалық өзара әрекеттесу мәселесі қарастырылды. Жұмыстың мақсаты-осы өзара әрекеттесуді ескеретін модельді әзірлеу және талдау, сонымен қатар инженерлік тәжірибеде қолдану үшін есептеу әдістерін жеңілдету.

Зерттеу жер төсемі жартылай шексіз кеңістік ретінде ұсынылған және жел турбинасының іргетасымен өзара әрекеттесу серіппелі-демпферлік элементтермен модельденетін модель құруды қамтиды. Есептеулерді жеңілдету үшін қаттылық пен демпферлік коэффициенттерді анықтауға арналған формулалар ұсынылды, олар ұсталған жер төсемінің ені турбина негізінің енінен едәуір асатын жағдайларда есептеулер жүргізуге мүмкіндік береді (5 және 10 есе).

Әзірленген әдістерді қолданудың мысалы ретінде Бадамша ауылында орналасқан жағалаудағы жел турбинасына талдау жасалынды. Сандық модельдеу нәтижелері ұсынылған модельдің және жеңілдетілген есептеу әдістерінің сәйкестігін растайды, бұл оларды жел турбиналарын жобалау және салу үшін пайдалы етеді.

Осы зерттеу Қазақстанда жел турбиналарын жобалау саласына үлес қосады, іргетас пен жер төсемінің динамикалық өзара әрекеттесуін дәлірек және тиімді талдау үшін жаңа тәсілдер мен әдістерді ұсынады, бұл болашақта мұндай құрылымдардың сенімділігі мен экономикалық тиімділігін арттыру мүмкіндігін береді.

## ANNOTATION

In this scientific article, the problem of dynamic interaction of the foundation of a wind turbine with a capacity of 4.8 MW with the ground cover was considered. The purpose of the work is to develop and analyze a model that takes into account these interactions, as well as simplify computational methods for use in engineering practice.

The research involves building a model in which the ground floor is presented as a semi-infinite space and interaction with the foundation of a wind turbine is modeled by spring-damping elements. To simplify the calculations, formulas for determining the stiffness and damping coefficients were proposed, which make it possible to perform calculations in cases where the width of the retained ground cover significantly exceeds the width of the turbine base (5 and 10 times).

An example of using the developed methods was the analysis of a coastal wind turbine located in the village of Badamsha. The results of numerical modeling confirm the correspondence of the proposed model and simplified calculation methods, which makes them useful for the design and construction of wind turbines.

This research contributes to the field of wind turbine design in Kazakhstan, offers new approaches and methods for a more accurate and effective analysis of the dynamic interaction of the foundation and the earth's surface, which will allow in the future to increase the reliability and economic efficiency of such structures.

**Түйін сөздер:** *іргетас, жел турбинасы, динамикалық өзара әрекеттесу моделі, жер төсемі, серіппелі-демпферлік элементтер, жартылай шексіз кеңістік, қаттылық коэффициенті, демпферлік коэффициент.*

**Key words:** *foundation, wind turbine, dynamic interaction model, ground cover, spring-damping elements, semi-infinite space, stiffness coefficient, damping coefficient.*

**Кіріспе.** Жел энергиясы - бұл экологиялық ортаға аз әсер ететін электр энергиясын өндірудің экологиялық таза түрі. Соңғы жылдары әлемдегі жел энергиясын өндіру қарқынды дамып, жел энергиясы жаңартылатын энергияның ең жылдам дамып келе жатқан технологиясына айналды [1]. Қазақстандағы жел энергетикасының белгіленген қуаты дамуда, ол негізінен жағалаудағы жел энергетикасына тәуелді [2]. Жағалаудағы жел энергетикасының электр энергиясын өндіру құны теңіздегі жел энергетикасына қарағанда төмен және гидроэнергетикамен салыстыруға болады [3]. Бұл 2030 жылға қарай Қазақстанның жағалаудағы жел қондырғыларының өсу қарқыны салыстырмалы түрде жоғары деңгейде сақталады деп күтілуде. Жаңадан салынған жағалаудағы жел турбиналарының бірлік қуаты негізінен 4,8 МВт құрайды, бірақ технологияның дамуымен болашақта бір Энергия блогының қуаты одан әрі артады.

Кең ауқымды жағалаудағы жел турбиналары негізінен іргетасты кеңейту үшін дөңгелек темірбетонды пайдаланады, ал 4,8 МВт жел турбиналарының диаметрі негізінен 20 м-ден асады. Жағалаудағы жел турбиналары негізінен рельефі күрделі және құрылысы ыңғайсыз биік таулар мен төбелерде шоғырланған. Құрылыс процесінде жел турбинасының негізі бұл көп ақша мен уақытты қажет етеді. Дегенмен, желдеткіш іргетасы мен жер төсемі арасындағы динамикалық өзара әрекеттесу желдеткіш іргетасын жобалау кезінде ескерілмейді және динамикалық талдау нәтижесінде алынған нәтижелер көбінесе нақты жағдайдан айтарлықтай ауытқып, шамадан тыс консервативті дизайнға әкеледі.

Ірі жел турбиналарының іргетасы мен жер төсемі арасындағы өзара әрекеттесуді зерттеу үшін Зайджер жел турбинасының іргетасының динамикалық моделін жеңілдету үшін жер төсемін ауыстыру үшін қаттылық матрицасын қолданды, бірақ кейбір жел турбиналарын динамикалық есептеу кезінде жоғары қателік болды [4]. Ахмус және т.б. жел турбинасының негізіне жер төсемінің әсерін көрсету үшін деграациялық қаттылық моделін қолданды, бірақ модель практикалық қолдануда қосымша тексеруді қажет етеді және практикалық жобалауда консервативті әдісті қолдану ұсынылады [5]. Ке және басқалар желдеткіш пен жер төсемінің негізінің түйіскен жерінде жаппай серіппелер мен демпферлерді орналастыру арқылы іргетас пен жер төсемінің өзара әрекеттесуін қарастырды [6]. Практикалық жобада инженерлер ішкі деңгейлердің шектеулі диапазонын ұстап алады және ұсталған ішкі деңгейлердің шекараларына тұрақты шектеулер қояды. Ұсталған ішкі деңгейлер желдеткіш негізі мен жер

төсемінің өзара әрекеттесуін есепке алу үшін желдеткіш негізімен бірге есептеледі [7-8]. Бұл әдістер жер төсемін жартылай шексіз кеңістік ретінде қарастырмайды және жер төсемінің жартылай шексіз кеңістігінде толқындардың таралуы мен энергияның шашырауын есепке алмайды және есептелген нәтижелер нақты жағдайдан айтарлықтай ерекшеленеді.

Осыған байланысты бұл мақалада Бадамша ауылындағы 4,8 МВт үлкен жағалаудағы жел турбины мысал ретінде қарастырылады, іргетас арасындағы динамикалық өзара әрекеттесуді ескере отырып, есептеу моделі орнатылады жел турбинының жер төсемі де, құрылыс инженерлері есептеуге ыңғайлы жеңілдетілген әдіс ұсынылады.

**Зерттеу материалдары мен әдістері.** Бадамша ірі жел турбиналарының іргетасының құрылымын және динамикалық өзара әрекеттесу моделін құру.

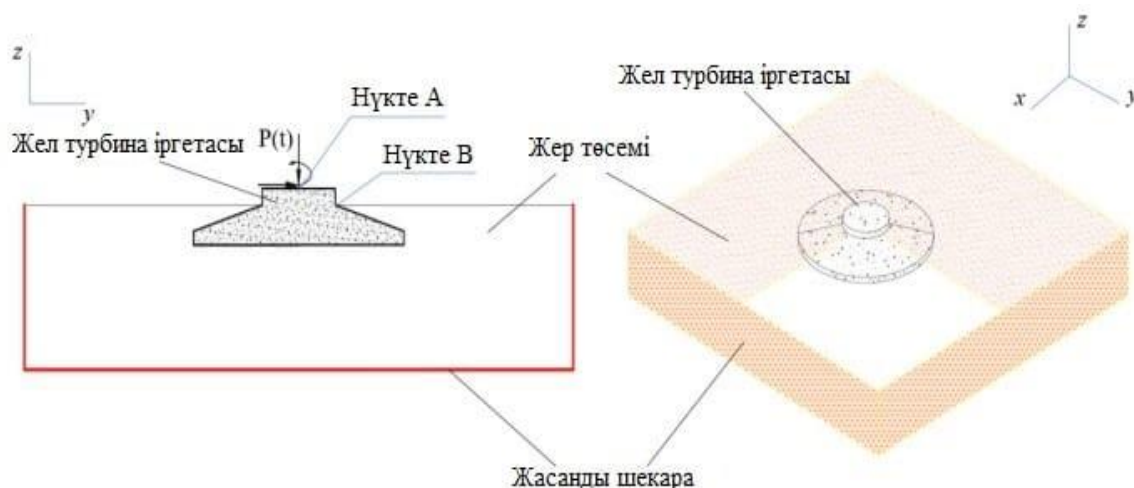
Бұл мақала Бадамша ауылындағы ірі 4,8 МВт жел турбинының негізіне негізделген. Жел турбинының іргетасы диаметрі 24 м және биіктігі 6 м дөңгелек кеңейетін негізді пайдаланады. Іргетас бағанының диаметрі 6 м, іргетас төсеу тереңдігі 5,5 м, ал бетонның беріктік класы С40. Төтенше жұмыс жағдайында жел турбинының іргетасына жүктемелердің есептік тіркесімі көлденең күш  $F_x=1673,2$  кН, тік күш  $F_z=4126,1$  кН. нәтижесінде  $M_{xy}=143554$  кН·м, қауіпсіздік коэффициенті 1,0-ге тең деп қабылданады және жүктемелердің тіркесімі іргетастың жоғарғы бетіне қолданылады.

$$v = v_0 + v t \quad (1)$$

Жел жүктемелерін есептеу кезінде желдің жалпы жылдамдығы  $v$  әдетте суперпозиция ретінде қарастырылады желдің орташа жылдамдығы  $v_0$  және желдің өзгеру жылдамдығы  $vt$ :

$$F = F_0 + F \sin(2\pi t/T) \quad (2)$$

Жартылай шексіз жер төсемін өңдеу жел турбины негізінің жер төсемімен динамикалық өзара әрекеттесуін модельдеу кезінде өте маңызды. Ең көп қолданылатын әдіс-топырақтың шектеулі диапазонын ұстап алу және жер төсемінің шекараларына жасанды шекаралар қою, бұл дизайнерлер үшін оңай түсініледі және есептеу бағдарламалық жасақтамасы оңай жүзеге асырылады. Жел турбинының негізін есептеудің ауқымды моделі 1-суретте көрсетілген. Бұл жағдайда ұсталған жер учаскесінің мөлшері және жасанды шекараларды орнату осы әдісті қолданудың екі негізгі факторы болып табылатын есептеулердің дәлдігі мен тиімділігіне әсер етеді (сурет 1).



Сурет 1 – Ірі масштабты жел турбины іргетасының жер төсемімен динамикалық өзара әрекеттесуінің есептік моделі.

$$\sigma(r, t) = -\rho C u(r, t) - K u(r, t) \quad (3)$$

Жобалау және есептеу кезінде 1-суреттегі жасанды шекараны бекітілген шекара ретінде орнату жер төсемінің жартылай шексіз кеңістігін дәл еліктей алмайды және толқын шекараға таралғаннан кейін шағылысады және есептеу нәтижесіне әсер етеді. Кернеу түріндегі жасанды шекараны қолдана отырып, шекаралық кернеуді жасанды шекара түйініндегі жылдамдық пен орын ауыстыру арқылы келесідей көрсетуге болады:

$$\sigma(r, t) = -\rho C u(r, t) - K u(r, t) \quad (4)$$

Олардың ішінде  $\gamma$  - жасанды шекара нүктесінен нүкте көзіне дейінгі қашықтық.

Формуланы талдағаннан кейін (4),  $-\rho C$  жылдамдығының қосындысының коэффициенті шекара түйініндегі демпферге тең болуы мүмкін, ал  $-K$  ығысу қосындысының коэффициенті сызықтық серіппеге тең болуы мүмкін. Амортизатор серіппесін жасанды шекара элементіне орнату арқылы динамикалық толқындардың жасанды шекаралар арқылы өту процесі модельденеді. Уақытша аймақтағы жасанды шекараның ығысу толқынының өрнегіне сүйене отырып, жер төсемінің жартылай шексіз аймағы серпімді дене ретінде қабылданады және шекаралық түйіндердің қалыпты кернеуі мен ығысу кернеуін алу үшін физикалық және геометриялық теңдеулер енгізіледі:

$$\sigma_N = -\frac{(\gamma+2G)}{r(1+b\gamma/al)} u_N(r, t) - \rho c_p u_N(r, t) \quad (5)$$

$$\sigma_T = -\frac{G}{r(1+b\gamma/al)} u_T(r, t) - \rho c_s u_T(r, t) \quad (6)$$

$\rho$  - жер төсемінің тығыздығы;  $\lambda$  - лямбда коэффициенті;  $G$  - ығысу модулі;  $c_p$  - бойлық толқынның жылдамдығы;  $c_s$  - ығысу толқынының жылдамдығы;  $a$  - шашырау толқындарының саны;  $b$  - жазық толқындардың саны;  $l$  - өлшемдерді үйлестіру коэффициенті.

Өлшеусіз параметр  $A = br/al$ ,  $A \in [0, +\infty]$  жасанды шекара қаттылығының түзету коэффициенті ретінде енгізіледі. Аралас толқындардың жиілігін ескере отырып, өлшемсіз  $B$  параметрі түзету коэффициенті ретінде енгізіледі.

Параметрлері  $\alpha = E(1-\mu)/[1-2\mu(1+\mu)]$  және  $\beta = (1-2)/(2-2\mu)$  енгізіледі, онда  $\mu$  - Пуассон коэффициенті. Шекаралық түйіннің серіппелі-демпферлік элементінің қаттылығы мен демпферлік коэффициенттері:

$N$  шекаралық түйіннің қалыпты бағыты:

$$K_N = \frac{\alpha}{r} \frac{1}{(1+A)} \quad C_N = B(\alpha\beta\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Шекаралық түйіннің тангенс бағыты  $T$ :

$$K_T = \frac{\alpha}{r} \frac{1}{(1+A)} \beta \quad C_T = B(\alpha\beta\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$\gamma$  параметрі - бұл толқынның шашырау көзінен жасанды шекара түйініне дейінгі қашықтық, оны нақты инженерлік есептеуде негізгі геометриялық орталықтан тиісті жасанды шекараға дейінгі тік қашықтық ретінде жеңілдетуге болады.  $A$  және  $B$  мәндері толқынның таралу сипаттамаларына және түсу бұрышына байланысты. Қолданыстағы эксперименттік нәтижелерге сәйкес, жер төсемінің орташа сызықтық серпімділігі кезінде, жер төсемінің ұстау диапазоны іргетастан 10 есе көп болған кезде, оңтайлы мәндер аймағы 0,8, ал  $B$  1.1, ал түйіннің физикалық компоненттерінің қаттылығы мен демпферлік коэффициенттері одан әрі жеңілдетілуі мүмкін:  $K_N = \alpha/18$ ,  $C_N = 1.1\sqrt{\alpha\rho}$ ,

$$K_T = \alpha\beta/18, \quad C_T = 1.1\sqrt{\alpha\beta\rho} \text{ [9].}$$

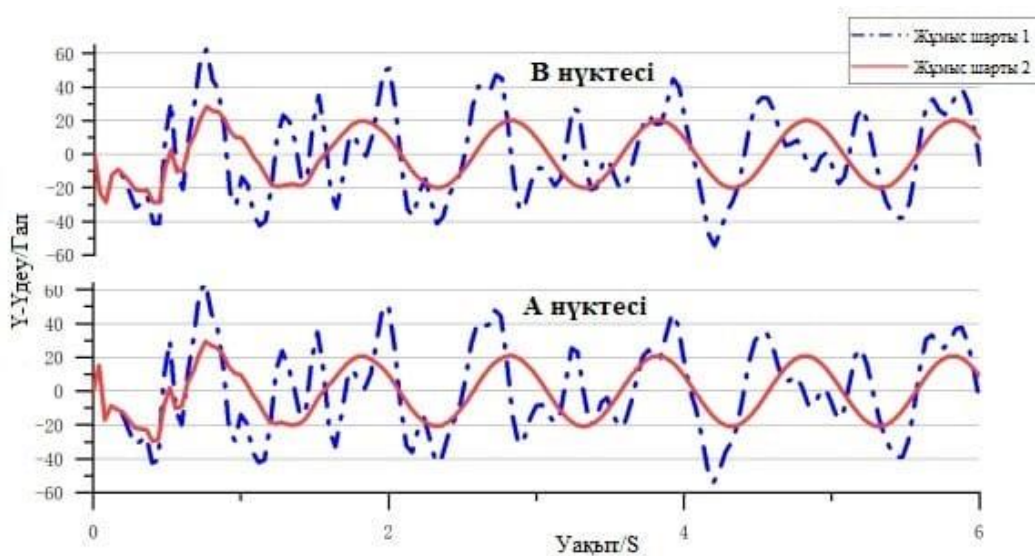
**Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау.** Жел турбинасы негізінің жер төсемімен динамикалық өзара әрекеттесуін есептеу және талдау нәтижелері.

Конструкторлар жер төсемінің жартылай шексіз кеңістігін еліктей алатын қаттылық пен демпферлік коэффициентті есептеудің жеңілдетілген формулаларын қолдана отырып, жер төсемінің шекараларын кесіп өту түйіндеріне серіппелі-демпферлік элементтерді орнатады. 1-суретте көрсетілгендей, желдеткіш негізі-жер төсемі ADINA соңғы элементтерінің бағдарламалық жасақтамасымен модельденеді, ал А және В бақылау нүктелері сәйкесінше негіздің жоғарғы бетінің ортасына және айнымалы қимаға орнатылады. Жер төсемін ұстау диапазоны іргетастың өлшемінен 10 есе көп, жер төсемінің жұмыс күйіндегі шекарасы 1-де бекітілген шекара бар, жер төсемінің жұмыс күйіндегі шекарасы 2-де кернеулі типтегі жасанды шекара бар, ал шекаралық түйіндер серіппелі-демпферлік элементтердің көмегімен орнатылады [10-14]. Жер төсемі мен жел генераторының іргетасы материалының параметрлері 1-кестеде келтірілген. Төтенше жағдайларда жел турбинасың іргетасына жүктемелердің есептік комбинациясы (2) формулаға сәйкес іргетастың жоғарғы бетіне жүктеледі. Динамикалық есептеу уақыты-6 секунд, ал есептеудің әр қадамы - 0,01 секунд, барлығы 600 қадам (кесте 1).

Кесте 1 – Жел турбинасының іргетасы мен жер төсемі материалының параметрлері

| Материал параметрлері                | Жер төсемі          | Жел турбинасының іргетасы |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| серпімді модуль ( $N \cdot m^{-2}$ ) | 2,5x10 <sup>8</sup> | 3,25x10 <sup>10</sup>     |
| тығыздық ( $Kg \cdot m^{-3}$ )       | 2000                | 2500                      |
| Пуассон коэффициенті                 | 0,2                 | 0,25                      |

Есептеулер нәтижесінде А және В нүктелеріндегі екі жұмыс жағдайы үшін Y бағытындағы үдеудің уақыт қисықтары 2-суретте көрсетілген, мұнда абсцисса уақыт, ал ордината үдеу болып табылады (сурет 2).



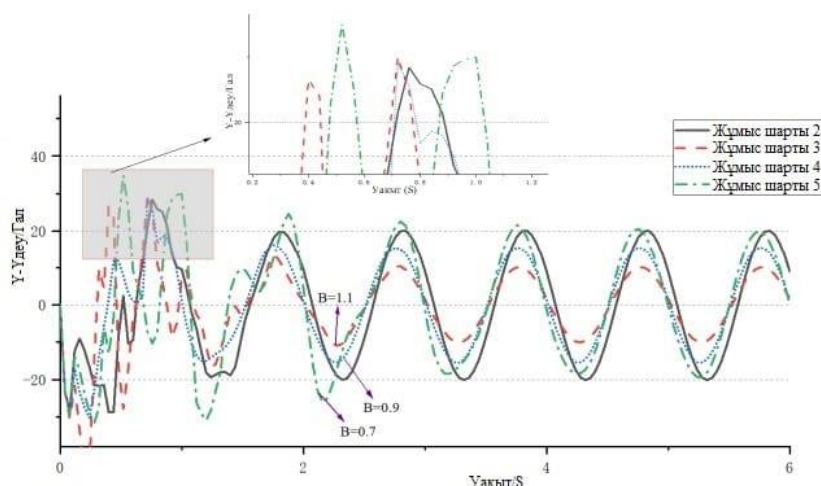
Сурет 2 – Әр түрлі жасанды шекаралық жағдайларда А нүктесі мен В нүктесінің Y бағытындағы үдеудің уақыт қисығы

2-суреттен А және В нүктелеріндегі үдеудің уақытқа тәуелділік қисықтары ұқсас екенін және бекітілген шекара есептеу нәтижелерінің дәлдігіне әсер ететін толқын шағылысын тудыратынын көруге болады. Бұл есептеу нәтижелерін тым үлкен етеді, сондықтан олар жел турбинасы негізінің жер төсемінің динамикалық өзара әрекеттесуін шынымен көрсете алмайды және шамадан тыс консервативті дизайнға әкеледі. Жер төсемінің шекарасына бекітілген

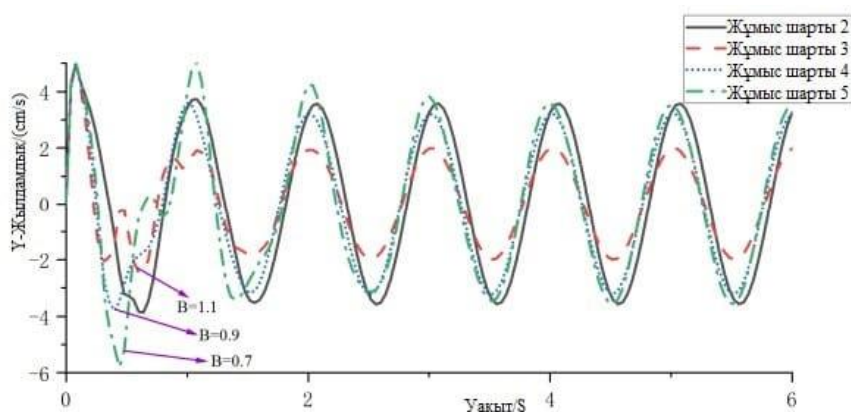
шекараны орнату қарапайым болғанымен, есептеу нәтижесінің ауытқуы үлкен және бұл жел турбинасының іргетасын жобалауға жарамайды. Құрылымды жобалаушы жел турбинасының іргетасының өлшемінен 10 есе үлкен жер төсемімен қабаттасады және жер төсемінің шекара түйіндерінде серіппелі-демпферлік элементтерді қолданады.  $K$  Және  $C$  мәндері жеңілдетілген формула бойынша есептеледі, олар тек жер төсемі материалының параметрлеріне қатысты. Бұл есептеу әдісі қарапайым және тиімді және бұл практикалық әдіс [15-16].

Ұсталған жер төсемінің мөлшері есептеу тиімділігіне үлкен әсер етеді. Ұсталған жер төсемінің мөлшерін азайту есептеулер көлемін едәуір қысқартуы мүмкін. Нақты инженерлік қызметте дизайнерлер көбінесе іргетастың өлшемінен 5 есе үлкен жер төсемін есептеу үшін пайдаланады. Ұсталған жер төсемінің диапазоны іргетастың көлемінен 5 есе үлкен болғанда және 2 жұмыс күйіндегідей есептеу әдісі қолданылса, есептеу нәтижесі нақты мәннен аз болады және бұл есептеу дәлдігіне әсер етеді. Бұл нәтиженің себебі демпферлік элементтердің мөлшері болуы мүмкін. (7) және (8) теңдеулерден  $C$  мәнінің ұсталған жер төсемінің өлшеміне ешқандай қатысы жоқ екенін көруге болады. Ұсталған жер төсемінің мөлшері өзгереді, бірақ шыршаның мәні өзгермейді. Сондықтан, жел турбинасының негізінің мөлшерінен 5 есе үлкен жер төсемі есептеу үшін пайдаланылған кезде,  $C$  мәнін есептеу формуласындағы  $B$  параметрін түзету қажет. Бұл жағдайда 1.1 оңтайлы  $B$  мәні болмауы мүмкін [17-19].

Жоғарыдағы талдауға сүйене отырып, модельдеу 2 жұмыс жағдайына сәйкес жүзеге асырылады. Жер төсемінің қиылысу диапазоны жел турбинасының іргетасының көлемінен 5 есе көп. Есептеу нәтижесінде үдеудің уақытқа тәуелділік қисығы және 2-5 жұмыс жағдайындағы  $A$  бақылау нүктесінің жылдамдыққа тәуелділік қисығы суретте көрсетілген (сурет 3 және 4).



Сурет 3 – 2-5 жұмыс жағдайында  $A$  нүктесінің  $Y$  бағытындағы үдеудің уақыт қисығы



Сурет 4 – Жұмыс жағдайында  $A$  нүктесінің  $Y$  бағытындағы жылдамдығының өзгеруінің уақыт қисығы 2-5

Талдау негізінде 3-суретте және 4-суретте көрсетілген ұсталған жер төсемінің диапазоны жел турбинасының негізінің өлшемінен 5 есе үлкен болғанда, параметр мәні өзгерген кезде Б үдеу мен жылдамдық ұқсас өзгеру тенденциясын көрсетеді.  $B = 1,1$  болғанда, бұл санның аз өсуін білдіреді. Мән  $0,7$  болғанда, бұл қандағы қанттың жоғарылауына әкеледі, мүмкін, ең үлкен ауытқу.  $B = 0,9$ -ға тең болмаған кезде, есептеу нәтижелері жел турбинасының іргетасынан 10 есе үлкен жер төсемінің кесу диапазонына жақсы сәйкес келеді. Көрініп тұр, бұл кезде сенат депутаттығына үміткер ұсынылды жер төсемі жиегінен 5 еселенген мөлшерінен жел турбина іргетасын, Қаттылығы және демпферлік коэффициенттері серіппелі-демпферлік элементтері жасанды шекаралық түйіндері ретінде жеңілдетуге болады:  $KN=\alpha/9$ ,  $CN=0.9\sqrt{\alpha\rho}$ ,  $KT=\alpha\beta/9$ ,  $CT=0.9\sqrt{\alpha\beta\rho}$  [20].

**Қорытынды.** Ішкі деңгейлердің шектеулі диапазонын ұстап, жер төсемінің шекараларында жасанды шекараларды орнату арқылы жел турбинасы іргетасының жер төсемімен динамикалық өзара әрекеттесу моделі жасалынды және сандық модельдеу есептеулері орындалды. Есептеу нәтижелерін салыстыра отырып, келесі қорытындыларды алуға болады:

1. Жасанды шекара үшін бекітілген шекараны пайдалану оңай, бірақ есептеу нәтижелері тым үлкен және жел турбинасының негізі мен жер төсемі арасындағы динамикалық өзара әрекеттесуді шынымен көрсете алмайды.

2. Кернеулі типтегі жасанды шекараны пайдалану және жер төсемінің шекарасына серіппелі-демпферлік элементтерді орнату көптеген компьютерлік бағдарламаларда жүзеге асырылуы мүмкін жер төсемінің жартылай шексіз кеңістігін тиімді еліктеуге мүмкіндік береді.

3. Жер төсемінің қиылысу диапазоны жел турбинасының түбінен 10 есе үлкен болғанда, серіппелі-демпферлік элементтердің қаттылығы мен демпферлік коэффициентін келесідей жеңілдетуге болатыны анықталды:  $KN=\alpha/18$ ,  $CN=1.1\sqrt{\alpha\rho}$ ,  $KT=\alpha\beta/18$ ,  $CT=1.1\sqrt{\alpha\beta\rho}$ . Қиылысқан жер төсемінің диапазоны жел турбинасының іргетасынан 5 есе үлкен болғанда, серіппелі-демпферлік элементтердің қаттылығы мен демпферлік коэффициентін келесідей жеңілдетуге болатыны анықталды:  $KN=\alpha/9$ ,  $CN=0.9\sqrt{\alpha\rho}$ ,  $KT=\alpha\beta/9$ ,  $CT=0.9\sqrt{\alpha\beta\rho}$ .

#### **ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1 Chen, Z. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines [Text] / Z. Chen [and etc.] // IEEE transactions on power electronics. -2019. –Vol. 24. -№24 (8). -p.1859-1875.

2 Dai, K. Effects of soil structure interaction on the design of tuned mass damper to control the seismic response of wind turbine towers with gravity base [Text] / K. Dai [and etc.] // Wind Energy. - 2020. –Vol. 24. № 24 (4). -p. 323-344.

3 Nema, P. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: a review [Text] / P. Nema [and etc.] // Renew Sustain Energy. -2021. –Vol. 13. -№13 (8). –p. 2096–2103.

4 Zaaier, M. Wind turbines. Foundation modeling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines [Text] / M. Zaaier // Applied Ocean Research. -2016. Vol. 28. -№28 (1). –p. 45-57.

5 Achmus, M. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [Text] / M. Achmus [and etc.] // Computers and Geotechnics. -2019. Vol. 36. № 36 (5). –p. 725-735.

6 Huang, H. Effects of soil structure interaction on the design of tuned mass damper to control the seismic response of wind turbine towers with gravity base [Text] / H. Huang [and etc.] // Wind Energy. -2020. Vol. 24. № 24 (4). -p. 323-344.

7 Gaudio, D. Three dimensional coupled finite-element analyses of the seismic performance of onshore wind turbines on liquefiable soil [Text] / D. Gaudio [and etc.] // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2024. Vol. 150. № 150 (5). –p. 10-15.

8 Xu, X. Study on ground mechanical characteristics of tower foundation of wind turbine with capacity more than one megawatt [Text] / X. Xu [and etc.] // China Water Power. -2012. Vol. 38. - № 38 (12). -p. 3.

9 Zhifan, H. Simplified analysis of dynamic machine foundation-subgrade dynamic interaction [Text] / H. Zhifan [and etc.] // Proceedings of the SPIE. – 2021. Vol. 12127. -p. 6.

10 Ramirez Camargo, L. Potential Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems for Self-Sufficient Residential Use in Germany and the Czech Republic [Text] / L. Ramirez Camargo [and etc.]

// Energies. - 2019. №12 (21). –p. 28.

11 Изатуллаева, Б. Необходимость инвестирования и использования возобновляемых источников энергии в Казахстане [Текст] / Б. Изатуллаева [и др.] // Прорывные экономические реформы в условиях. – 2015. № 1. –с. 172.

12 Абдыгаппарова, С. Проблемы использования возобновляемых источников энергии в Казахстане [Текст] / С. Абдыгаппарова [и др.] // Вестник университета Туран. – 2015. №4. –с. 73-77.

13 Абдрахимова, Е. Влияние усадочных напряжений при формировании водонепроницаемой структуры кислотоупоров [Текст] / Е. Абдрахимова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. - 2004. - № 10. – с. 29-31.

14 Dai, K. Nonlinear response history analysis and collapse mode study of a wind turbine tower subjected to cyclonic winds [Text] / K. Dai [and etc.] // Wind Struct. -2017. № 25 (1). –p. 79-100.

15 Rahman, M. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: a review [Text] / M. Rahman [and etc.] // Renew Sustain Energy Rev. -2015. № 51. –p.43-54.

16 Roth, S. Strongly coupled XFEM formulation for non-planar three-dimensional simulation of hydraulic fracturing with emphasis on concrete dams [Text] / S. Roth [and etc.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. -2020. Vol. 363. -p.363.

17 Marcus, V. Foundation and support structures of wind turbines and optimization [Text] / V. Marcus [and etc.] // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. -2024. № 4. –p. 73-77.

18 Liu, J. Comparative study on dynamic responses of integrated installation process of a 5-MW and a 15-MW offshore wind turbine considering a pre-installed foundation [Text] / J. Liu [and etc.] // Ocean Engineering. -2024. № 2. –p.25-34.

19 Lombardi, D. Dynamic soil structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil [Text] / D. Lombardi [and etc.] // Soil Dynam Earthquake Eng. -2013. № 49. – p. 165-180.

20 Lin, K. Experimental study of wind turbine in operation under wind and seismic excitations with soil-structure interaction [Text] / K. Lin [and etc.] // Engineering Structures. -2024. Vol 308. – p. 119-135.

## REFERENCES

1 Chen, Z. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines [Text] / Z. Chen [and etc.] // IEEE transactions on power electronics. -2019. –Vol. 24. -№24 (8). - p.1859-1875.

2 Dai, K. Effects of soil structure interaction on the design of tuned mass damper to control the seismic response of wind turbine towers with gravity base [Text] / K. Dai [and etc.] // Wind Energy. - 2020. –Vol. 24. № 24 (4). -p. 323-344.

3 Nema, P. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: a review [Text] / P. Nema [and etc.] // Renew Sustain Energy. -2021. –Vol. 13. -№13 (8). –p. 2096–2103.

4 Zaaijer, M. Wind turbines. Foundation modeling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines [Text] / M. Zaaijer // Applied Ocean Research. -2016. Vol. 28. -№28 (1). –p. 45-57.

5 Achmus, M. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [Text] / M. Achmus [and etc.] // Computers and Geotechnics. -2019. Vol. 36. № 36 (5). –p. 725-735.

6 Huang, H. Effects of soil structure interaction on the design of tuned mass damper to control the seismic response of wind turbine towers with gravity base [Text] / H. Huang [and etc.] // Wind Energy. -2020. Vol. 24. № 24 (4), -p. 323-344.

7 Gaudio, D. Three dimensional coupled finite-element analyses of the seismic performance of onshore wind turbines on liquefiable soil [Text] / D. Gaudio [and etc.] // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2024. Vol. 150. № 150 (5). –p. 10-15.

8 Xu, X. Study on ground mechanical characteristics of tower foundation of wind turbine with capacity more than one megawatt [Text] / X. Xu [and etc.] // China Water Power. -2012. Vol. 38. - № 38 (12), -p. 3.

9 Zhifan, H. Simplified analysis of dynamic machine foundation-subgrade dynamic interaction [Text] / H. Zhifan [and etc.] // Proceedings of the SPIE. – 2021. Vol. 12127. -p. 6.

- 10 Ramirez Camargo, L. Potential Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems for Self-Sufficient Residential Use in Germany and the Czech Republic [Text] / L. Ramirez Camargo [and etc.] // *Energies*. - 2019. №12 (21). –p. 28.
- 11 Izatullaeva, B. Neobhodimost' investirovaniya i ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii v Kazahstane [Tekst] / B. Izatullaeva [i dr.] // *Proryvnye ekonomicheskie reformy v usloviyah*. – 2015. № 1. –s. 172.
- 12 Abdygapparova, S. Problemy ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii v Kazahstane [Tekst] / S. Abdygapparova [i dr.] // *Vestnik universiteta Turan*. – 2015. №4. –s. 73-77.
- 13 Abdrahimova, E. Vliyanie usadochnyh napryazhenij pri formirovanii vodonepronicaemoj struktury kislotouporov [Tekst] / E. Abdrahimova [i dr.] // *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. - 2004. - № 10. – s. 29-31.
- 14 Dai, K. Nonlinear response history analysis and collapse mode study of a wind turbine tower subjected to cyclonic winds [Text] / K. Dai [and etc.] // *Wind Struct*. -2017. № 25 (1). –p. 79-100.
- 15 Rahman, M. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: a review [Text] / M. Rahman [and etc.] // *Renew Sustain Energy Rev*. -2015. № 51. –p.43-54.
- 16 Roth, S. Strongly coupled XFEM formulation for non-planar three-dimensional simulation of hydraulic fracturing with emphasis on concrete dams [Text] / S. Roth [and etc.] // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. -2020. Vol. 363. -p.363.
- 17 Marcus, V. Foundation and support structures of wind turbines and optimization [Text] / V. Marcus [and etc.] // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. -2024. № 4. –p. 73-77.
- 18 Liu, J. Comparative study on dynamic responses of integrated installation process of a 5-MW and a 15-MW offshore wind turbine considering a pre-installed foundation [Text] / J. Liu [and etc.] // *Ocean Engineering*. -2024. № 2. –p.25-34.
- 19 Lombardi, D. Dynamic soil structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil [Text] / D. Lombardi [and etc.] // *Soil Dynam Earthquake Eng*. -2013. № 49. – p. 165-180.
- 20 Lin, K. Experimental study of wind turbine in operation under wind and seismic excitations with soil-structure interaction [Text] / K. Lin [and etc.] // *Engineering Structures*. -2024. Vol 308. – p. 119-135.

### **РЕЗЮМЕ**

В данной научной статье рассмотрена проблема динамического взаимодействия фундамента ветряной турбины мощностью 4,8 МВт с земляным полотном. Цель работы - разработать и проанализировать модель, учитывающую эти взаимодействия, а также упростить вычислительные методы для применения в инженерной практике.

Исследование предполагает создание модели, в которой земляное полотно представлено как полубесконечное пространство, а взаимодействие с фундаментом ветряной турбины моделируется пружинно-демпфирующими элементами. Для упрощения расчетов были предложены формулы для определения коэффициентов жесткости и демпфирования, которые позволяют проводить расчеты в случаях, когда ширина удерживаемого земляного полотна значительно превышает ширину основания турбины (в 5 и 10 раз).

В качестве примера применения разработанных методов был проведен анализ прибрежной ветряной турбины, расположенной в селе Бадамша. Результаты численного моделирования подтверждают соответствие предложенной модели и упрощенных методов расчета, что делает их полезными для проектирования и строительства ветряных турбин.

Настоящее исследование вносит вклад в область проектирования ветряных турбин в Казахстане, предлагает новые подходы и методы для более точного и эффективного анализа динамического взаимодействия фундамента и земляного полотна, что дает возможность в будущем повысить надежность и экономическую эффективность таких сооружений.