

«Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті» коммерциялық емес  
акционерлік қоғамы

ӘОЖ 621.548.5

Қолжазба құқығында

## **БАЙЖҰМА ЖАНДОС ЕСКЕНДІРҰЛЫ**

**«ШҰҒЫЛ КОНТИНЕНТАЛЬДЫ АЙМАҚТАРДА ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН  
ЖЕЛ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ МҰЗ ҚАТУ ПРОБЛЕМАСЫНЫҢ ТЕХНИКА-  
ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ШЕШІМІ»**

6D072300 – Техникалық физика

Философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілер:

Белегенова С.А.  
ф-м.ғ.д., профессор,  
әл-Фараби атындағы  
ҚҰУ

Манатбаев Р.Қ.  
т.ғ.к., қауымдастырылған  
профессор, әл-Фараби  
атындағы ҚҰУ

Aleksandar Georgiev  
PhD, professor  
Technical University of  
Sofia, Plovdiv branch

Қазақстан Республикасы  
Алматы қаласы, 2023

## МАЗМҰНЫ

<b>БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР .....</b>	<b>3</b>
<b>КІРІСПЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1 ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ МЕН ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫНА ШОЛУ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Әлемдегі мемлекеттердің энергетикалық теңгерімінде жаңартылатын энергия көздерін пайдалану деңгейі .....	9
1.2 Дүниежүзінде жаңартылатын энергия көздерінің даму тенденциялары .....	18
1.3 Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерінің даму тенденциялары.....	24
1.4 Шұғыл континентальды аймақтарда орналасқан жел турбиналарының мұз қату мәселесі .....	36
<b>2 ТЫНЫШТЫҚТА ТҮРҒАН ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ҚАЛАҚШАСЫН МҰЗ БАСУЫН САНДЫҚ ЖОБАЛАУ.....</b>	<b>42</b>
2.1 Тік қалақшалы турбиналардың қалақшаларында мұз қату процесін Ansys FLUENT және FENSAP-ICE көмегімен жобалаудың сандық әдісі .....	42
2.2 Сандық әдісті тәжірибе нәтижелерімен салыстырып тексеру .....	48
2.3 Мұз басудың жел турбиначасы қалақшасының аэродинамикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу .....	52
2.4 Мұз басқан қалақшаның жел турбиначасының өнімділігіне әсерін бағалау ...	55
<b>3 АЙНАЛЫП ТҮРҒАН ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ҚАЛАҚШАСЫНА МҰЗ ҚАТУДЫ САНДЫҚ ЖОБАЛАУ .....</b>	<b>58</b>
3.1 Ansys FLUENT және FENSAP-ICE көмегімен айналып тұрған Дарье жел турбиначасын мұз басуды жобалаудың сандық әдісі .....	58
3.2 Айналымды қозғалыстағы жел турбиначасының қалақшасында мұз қатуды сандық жобалау әдісін тәжірибемен салыстырып тексеру.....	63
3.3 Мұз басқан жел турбиначасының өнімділігін талдау.....	68
<b>4 ЖЫЛУЛЫҚ ҚОРҒАУЫ БАР 1 КВТ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫН ЖОБАЛАУ</b>	<b>77</b>
4.1. Дарье жел турбиначасының қуыс элементтерінде табиғи желдету құбылысын зерттеу.....	77
4.2 Жылулық қорғанысы бар 1кВт жел турбиначасының конструкциясы.....	82
<b>Қорытынды.....</b>	<b>92</b>
<b>Пайдаланылған әдебиеттер тізімі.....</b>	<b>94</b>
<b>А ҚОСЫМША. Жел энергетикалық қондырғының құрылысы .....</b>	<b>101</b>

## БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

Латын әріптері

$A$	аудан [ $\text{м}^2$ ]
$c$	хорданың ұзындығы [ $\text{м}$ ]
$C_f$	судың меншікті жылусыйымдылығы [ $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ]
$C_{ice}$	мұздың меншікті жылусыйымдылығы [ $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ]
$C_p$	қысым коэффициенті ( $p/(0.5\rho A V_\infty^2)$ )
$C_m$	момент коэффициенті ( $M/(0.5\rho A V_\infty^2 R)$ )
$C_{pw}$	қуат коэффициенті ( $M\omega/(0.5\rho A V_\infty^3)$ )
$C_D$	тамшыға әсер ететін кедергі коэффициенті
$D$	турбинаның диаметрі [ $\text{м}$ ]
$Fr$	Фруд саны ( $v_\infty/\sqrt{cg}$ )
$\vec{g}$	еркін түсу үдеуі ( $9.81$ [ $\text{м}/\text{с}^2$ ])
$H$	қалақшаның биіктігі [ $\text{м}$ ]
$h_f$	су қабықшасының биіктігі [ $\text{м}$ ]
$h_{ice}$	мұз қабатының биіктігі [ $\text{м}$ ]
$h$	конвекциялық жылутасымалдау коэффициенті
$K$	тамшының инерциялық параметрі ( $\rho_a MVD^2 V_{a,\infty}/18c\mu_w$ )
$k_s$	беттің кедір-бұдырлығы [ $\text{м}$ ]
$k$	жылуөткізгіштік [ $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ]
$L$	меншікті балқу жылуы [ $\text{Дж}/\text{кг}$ ]
$l$	ұзындық [ $\text{м}$ ]
$M$	турбинаның айналу моменті [ $\text{Н}\cdot\text{м}$ ]
$\dot{m}_{com}$	су тамшыларының ағыны [ $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ]
$\dot{m}_{evap}$	булану қарқыны [ $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ]
$\dot{m}_{ice}$	судың қату қарқыны [ $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ]
$\vec{n}$	беттік нормаль вектор
$Nu$	Нуссельт саны ( $hl/k$ )
$p$	қысым [ $\text{Па}$ ]
$\dot{Q}_h$	конвекциялық жылу ағыны [ $\text{Дж}/\text{с}$ ]
$R$	радиус [ $\text{м}$ ]
$r$	салыстырмалы санақ жүйесі
$\vec{r}$	радиус вектор [ $\text{м}$ ]
$Re$	Рейнольдс саны ( $Wc/v$ )
$Re_d$	тамшының Рейнольдс саны ( $\rho_a V_\infty   MVD/\mu_a$ )
$T$	абсолют температура [ $\text{К}$ ]
$T_\infty$	ауаның температурасы [ $\text{К}$ ]
$\tilde{T}$	температура [ $^\circ\text{C}$ ]
$\tilde{T}_{d,\infty}$	тамшылардың температурасы [ $^\circ\text{C}$ ]
$t$	уақыт [ $\text{с}$ ]
$t_{icing}$	толық мұз басу уақыты [ $\text{с}$ ]

$\vec{u}$	жылдамдық векторы
$\vec{u}_{a,r}$	ауаның салыстырмалы жылдамдығы [м/с]
$\vec{u}_{d,r}$	тамшылардың салыстырмалы жылдамдығы [м/с]
$\vec{u}_f$	су қабықшасының жылдамдығы [м/с]
$V_\infty$	ауаның жылдамдығы [м/с]
$W$	қалақшаның қорытынды жылдамдығы [м/с]
$x$	абсцисса [м]
$y$	ордината [м]

#### Грек әріптері

$\alpha$	ауа мен тамшылардың көлемдік үлесі
$\beta$	тамшыларды жинақтау коэффициенті
$\sigma$	Стефан-Больцман тұрақтысы ( $5.67 \times 10^{-8}$ [Вт·м <sup>-2</sup> ·К <sup>-4</sup> ])
$\Delta A$	сегмент ауданы [м <sup>2</sup> ]
$\Delta \theta$	азимуттық бұрыш қадамы (36 [°])
$\Delta t$	уақыттық қадам [с]
$\varepsilon$	қатты заттың сәуле шығару коэффициенті [м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup> ]
$\mu$	динамикалық тұтқырлық [Па·с]
$\nu$	кинематикалық тұтқырлық [м <sup>2</sup> /с]
$\theta$	азимуттық бұрыш [°]
$\rho_a$	ауаның тығыздығы [кг/м <sup>3</sup> ]
$\rho_d$	тамшылардың тығыздығы [кг/м <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	судың тығыздығы [кг/м <sup>3</sup> ]
$\rho_{ice}$	мұздың тығыздығы [кг/м <sup>3</sup> ]
$\vec{\tau}_{a,wall}$	ауаның ығысу кернеуі [Па]
$\vec{\omega}$	бұрыштық жылдамдық [рад/с]
$\vec{\nabla}$	Гамильтон операторы
$\chi$	жүрдектік ( $\omega R/V_\infty$ )

#### Қысқартулар

АЭС	Атом электр станциясы
БҰҰ	Біріккен Ұлттар Ұйымы
ГЭС	Гидроэлектростанция
ЖЭК	Жаңартылатын энергия көздері
ЖЭС	Жылу электр станциясы
ЭЫДҰ	Экономикалық Ынтымақтастық және Даму Ұйымы
IEA	Халықаралық энергетикалық агенттік

## **КІРІСПЕ**

### **Зерттеу жұмыстың жалпы сипаттамасы**

Диссертациялық жұмыс шұғыл континентальды аймақтарда жұмыс істейтін жел қондырғыларының мұз қату мәселесін сандық және тәжірибелік зерттеуге арналған. Табиғи экологиялық таза энергияны, соның ішінде жел энергиясын пайдалану жел энергетикалық аппараттарын қолдануға байланысты. Диссертациялық жұмыста дәстүрлі энергия қорларын жылу және электр энергиясын өндіру мақсатымен қолданудың салдары – жаһандық жылыну қарастырылды. Жаһандық жылыну ғаламшарымызға қауіпті болмақ, себебі Жерде парниктік эффект туындап, климаттың өзгеруіне алып келеді. Сондықтан көптеген елдер жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) пайдалану қажеттілігіне жылдан жылға баса назар аударуда. Қазақстан жел энергиясына көп көңіл бөлуде, себебі Жердің солтүстік жарты шарының жел белдеуі Қазақстан арқылы өтіп жатыр және еліміздегі жел энергиясының қорлары жылына 32,2 триллион киловатт сағатқа жетеді [1].

### **Зерттеу тақырыбының өзектілігі**

Жел энергетикасы – жаңартылатын энергия көздерінің ішіндегі қарқынды дамушы бағыттарының бірі. 2022 жылы жел қуатынан алынған электр энергиясының мәні рекордтық 906 ГВт жетті. Ол жаңартылатын энергия көздерінен өндірілген қуаттың 17% құрады. 2021 жылдың көрсеткіштерімен салыстырғанда бұл көрсеткіш 9% артық болды. Мұндай шапшаң дамудың себебі – құрлықта және теңізде орнатылған жаңа электр станциялары. Десе де, бұл нәтиже 2050 жылға дейін көмірқышқыл газының нольдік эмиссиясына жету үшін жеткіліксіз: 2050 жылға дейін орнатылған жаңартылатын энергия көздерінің жалпы қуаты 7900 ГВт құрауы керек [2].

Аталған мақсаттарға қол жеткізу үшін жел электр станциялары орнатылатын жаңа аймақтар қажет. Жел генераторлары орнатылатын жерлерде адам тығыздығы төмен және желдің қуаты жоғары болуы тиіс. Мұндай жерлер шұғыл-континенталды климаты бар аймақтарда орналасқан. Бірақ, бұл аймақтарда орналасқан жел генераторлары аязды және боранды күндері мұз басуға ұшырайды. Жел генераторының қалақшаларында мұздың қатуы бірінші кезекте олардың аэродинамикалық сипаттамаларына зиянын тигізеді: қалақша бетінде қатқан мұз оның көтеру және тарту күшін төмендетеді.

Қазіргі уақытта жел турбиналарын мұз басудан қорғаудың бірқатар тәсілдері қолданылады. Солардың бірі – электрлік жылыту элементтері. Олар турбина қалақшасының бойымен орналастырылып, қоршаған ортаның белгілі температурасында қалақшаның бетін жылыта бастайды. Мұз басудан қорғаныстың келесі түрі – авиацияда кең қолданыс тапқан, химиялық әдістер. Аталған әдістің негізінде қалақшаның бетін арнайы ертінділермен өңдеу тәсілі жатыр. Ертінділер қалақшаның бетінде мұз қабатының қалыптасуына жол бермейді, басқаша сөзбен айтқанда, мұз қалақша бетінен «сырғып» түсіп қалады. Электрлік және химиялық әдістермен қатар, инженерлер ультрадыбыс көмегімен

калақша бетін қатқан мұздан тазарту әдісін ұсынды [3]. Алайда, аталған әдістердің барлығы ұзақ уақыт бойы төмен температураларда жұмыс атқаратын жел турбиналары үшін қолдануға жарамсыз. Себебі, электрлік және ультрадыбыстық әдістер қосымша жылыту элементтерін қосуды талап етеді, химиялық әдістер әрдайым жақын жерде қызмет көрсететін қызметкерлердің болуын қажет етеді. Осыған орай, диссертациялық жұмыстың мақсаты айқындалды.

#### **Зерттеу жұмыстың мақсаты**

Шұғыл континентальды аймақтарда жұмыс істейтін Дарье жел турбиναςында мұз қату мәселесін сандық және тәжірибелік тұрғыдан зерттеу; жылулық қорғанысы бар Дарье жел турбиναςын жобалау және жасау.

Айтылған мақсаттарға жету үшін келесі **міндеттері** шешу қажет:

1. Желдің түрлі атқылау бұрыштарында және қорғашаған ортаның түрлі жағдайларында Дарье турбиναςының қалақшасында мұз қатуын зерттеу;
2. Айналымы қозғалыстағы Дарье турбиναςының қалақшаларын мұз басу үрдісін зерттеу;
3. Мұз басқан турбинаның өнімділігін талдау;
4. Дарье турбиναςының қуыс элементтеріндегі табиғи желдетуді зерттеу;
5. Жылулық қорғанысы бар 1 кВт жел турбиναςын жобалау.

#### **Зерттеу нысаны**

Шұғыл континентальды аймақтарда орналасқан Дарье жел турбиναςы

#### **Зерттеу пәні**

Н-ротор түріндегі Дарье жел турбиναςының қалақшаларын мұз басу процесінің теориясы негізінде, жел турбиņasын мұз басу және жылулық қорғанысы.

#### **Зерттеу әдістері**

Айналымы қозғалыстағы Дарье жел турбиņasының қалақшаларын мұз басуды Ansys FLUENT және FENSAP-ICE бағдарламалық құралдардың көмегімен сандық жобаланды, жел турбиņasының қуыс элементтерінің табиғи желдетуі тәжірибелік жолмен анықталды.

#### **Қорғауға шығарылатын негізгі тұжырымдар:**

1. Қоршаған ортаның температурасына тәуелсіз Дарье жел турбиņasының бетінде тамшылар жинақталуының және конвективті суыну коэффициенттерінің шыңдық мәндері қалақша бетімен біркелкі таралады.
2. Жел жылдамдығы 3 м/с үлкен болған жағдайда, турбина 12 айн/мин жасайды, нәтижесінде қуыс элементтерде табиғи желдету пайда болады, сондықтан осы көрсеткіштерге жеткен кезде жел турбиналарында мұз басу пайда болмайды.
3. Жел турбиņasын модульдік платформаға орнату айналу білігін 8 м ден 1,3 м дейін қысқартуға мүмкіндік береді, жел турбиņasының мойынтіректеріне түсетін жүктеме 15% төмендейді.

#### **Диссертациялық жұмыстың жаңалығы, алғаш рет:**

1. Тыныштықтағы және айналып тұрған Дарье жел турбинасында мұз қату барысы зерттелді;

2. Дарье жел турбинасының қалақшасына мұз қатудың сандық әдісі ұсынылып, ғылыми әдебиеттерде жарияланған тәжірибелік және сандық зерттеу мәліметтермен валидацияланды;

3. Турбина элементтерінің ішкі желдетуінің көмегімен жылулық қорғаныс әдісі ұсынылды;

4. Жылулық қорғау жүйесі бар Дарье турбинасының конструкциялық жобалық құжаттамасы дайындалды.

#### **Жұмыстың ғылыми-практикалық маңыздылығы**

Зерттеу нәтижелері жел турбиналарын жобалау кезінде қолданылады.

#### **Дәлелділік пен нақтылық дәрежесі**

Дарье жел турбинасында мұз қатуды сандық жобалау ANSYS-Fluent және FENSAP-ICE көмегімен жобаланды. Сандық әдіс тәжірибелік мәліметтермен валидацияланып, мұз басуды жеткілікті дәлдікпен болжай алатынын көрсетті.

#### **Автордың өзінің қосқан үлесі**

Автор зерттеу жұмысының барлық кезеңдеріне қатысты: зерттеудің мақсаты мен міндеттерін анықтау; зерттеу объектісін таңдау. Данияның техникалық университетінде (DTU) тағылымдама барысында Дарье жел турбинасының қалақшаларында мұз қатуды сандық жобалау әдісін дайындап, тәжірибелік нәтижелермен валидациялап, жел турбинасының өнімділігіне мұз басудың әсерін зерттеді. Қуыс элементтердің ішкі желдетуін анықтау бойынша тәжірибелерді жасады және алынған мәліметтерді көрнекі түрде келтірді.

#### **Диссертациялық жұмыстың апробациядан өтуі**

Жұмыстың негізгі нәтижелері баяндалған және талқыланған жерлер:

– Alternative energy sources, materials and technologies (AESMT'18), халықаралық ғылыми конференциясы, Пловдив, Болгария, 14-15 мамыр 2018 ж.;

– Alternative energy sources, materials and technologies (AESMT'20), халықаралық ғылыми конференциясы, Варна, Болгария, 8-9 маусым 2020 ж.;

– Fluid dynamics section meeting, DTU, Люнгбю, Дания, 31 тамыз 2020 ж.

#### **Диссертациялық тақырыбы бойынша жарияланымдар**

Диссертациялық жұмыстың материалдары негізінде 4 баспа жұмысы жарияланды, оның ішінде Web of Science (Clarivate Analytics, АҚШ) және Scopus (Elsevier, Нидерланды) халықаралық ақпараттық базаларында 2 мақала, ҚР БЖҒМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда 1 мақала, халықаралық конференцияларда 1 мақала жарияланды:

– R. Manatbayev, Z. Baizhuma\*, S. Bolegenova, A. Georgiev, Numerical simulations on static Vertical Axis Wind Turbine blade icing, Renew. Energy. 170 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.023>. Q1, SJR 1.88;

– Z. Baizhuma, T. Kim, C. Son, Numerical method to predict ice accretion shapes and performance penalties for rotating vertical axis wind turbines under icing

conditions, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 216 (2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104708>. Q1, SJR 1.24.

– Авторлық куәлік №36381 «Development of a laboratory model of a carousel wind turbine with an anti-icing system»

### **Диссертация құрылымы мен көлемі**

Диссертация жұмысы кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан және 96 әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс 104 бетте баяндалған, ішінде 37 сурет, 22 кесте бар.

Кіріспеде диссертациялық жұмыс тақырыбының өзектілігі, жаңашылдығы, ғылыми және практикалық маңыздылығы, жұмыстың құндылығы, автордың жеке үлесі, диссертациялық жұмыс материалдары бойынша жарияланымдар туралы ақпарат келтірілген.

Бірінші бөлімде әлемдегі әр елдің энергиямен қамтылу жағдайына қысқаша шолу жасалған. Еуропалық (EWEA) және әлемдік (World Wind Energy Association-WWEA) жел энергетикасының белгілі деректері жүйеленген. Баламалы және дәстүрлі энергетика өндірісінің проценттік арақатынасы әлемдік және Қазақстан деңгейінде салыстырылды. Шұғыл континенталды аймақтарда орналасқан Дарье жел турбиналарында мұз қату мәселесіне шолу жасалды.

Екінші бөлімде тыныш тұрған жел турбинасы қалақшаларының суық ауа ағынымен әрекеттесіп, қалақшада мұздың түзілуі компьютерлік жолмен жобаланған. Мұз басудың әсерін бағалау мақсатымен турбинаның аэродинамикалық параметрлері есептеліп, оның өнімділігі анықталды. Алынған нәтижелер мұз басқанға дейінгі параметрлермен салыстырылып, талданды.

Үшінші бөлімде айналып тұрған жел турбинаның қалақшаларының суық ауа ағынымен әрекеттесіп, қалақшада мұздың түзілуі компьютерлік жолмен жобаланған. Мұз басудың әсерін бағалау мақсатымен турбинаның аэродинамикалық параметрлері есептеліп, оның өнімділігі анықталды. Алынған нәтижелер мұз басқанға дейінгі параметрлермен салыстырылып, талданды.

Төртінші бөлімде жел турбинасының қуыс элементтерінің табиғи желдетуін анықтау, жылуалмасу бойынша тәжірибелік мәліметтер келтірілген, сонымен қатар жылулық қорғанысы бар 1кВт жел турбинасының геометриялық параметрлерін анықтау мен конструкторлық құжаттамасы берілген.

Қорытынды бөлімде осы диссертацияны орындау барысында алынған негізгі нәтижелер мен тұжырымдар берілген.



# 1 ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ МЕН ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫНА ШОЛУ

## 1.1 Әлемдегі мемлекеттердің энергетикалық теңгерімінде жаңартылатын энергия көздерін пайдалану деңгейі

Қазіргі таңда электр энергиясы негізінен жылу энергиясынан (ЖЭС, АЭС) өндіріледі. Бұл жылу энергиясы қазба отындарды (көмір, мұнай, газ) жағу кезінде жылу шығарумен және уранның улылығы жоғары радиоактивті стронций, бериллий және т.б. сияқты химиялық элементтерді түзе отырып ыдырауын пайдаланумен байланысты.

Соңғы 100 жыл ішінде энергетикалық қорларды тұтыну мөлшері 15 есе ұлғайған. Оған қоса, Жер бетіндегі халық саны 1,7 млрд-тан 6,3 млрд-қа өскен. Осы ретте отын-энергетикалық қорлар халықтың жан басына шаққанда 4 есе өсіп, шартты түрде есептеу бойынша шамамен жылына 2,14 мың адамды құраған. 1.1.1-кестенің деректерінен көрініп тұрғандай, соңғы 37 жыл ішінде (1985 - 2022 жж.) энергия көздерін бастапқы тұтыну деңгейі шамамен 2 есе өскен [4–7].

Кесте 1.1.1 – Миллион тонна шартты отынды құрайтын энергетикалық қорларды әлемдік тұтыну [4–7]

Энергетикалық қорлар	1971ж.	2002ж.	2010ж.	2020ж	2030ж	Жылдық орташа өсім, %
Көмір	1979	3361	3887	4492	5066	1,5
Мұнай	3394	5171	6060	7138	8111	1,6
Соның ішінде теңіз кен орындары	149	205	208	214	228	0,4
Газ	1255	3081	3802	4855	5810	2,3
Ядролық отын	41	973	1094	1092	1075	0,4
Гидроресурстар	146	315	388	452	513	1,8
Биомасса мен қалдықтар	966	1574	1778	2009	2258	1,3
Соның ішінде биомассаны дәстүрлі тәсілмен өңдеу тәсілі	689	1073	1165	1249	1294	0,7
Басқа да энергия көздері	6	77	142	228	360	5,7
Барлығы	7787	14552	17151	20266	23193	1,7

Көмір мен мұнайды тұтыну мөлшерінің 2010 жылдан 2030 жылға дейінгі 20 жыл кезеңі ішінде 1,3 есе болжамды ұлғаюы үлкен күдік тудырмайды. Бәріміз білетіндей, Қытай мен Үндістанның қарқынды дамып келе жатқан экономикасы көмір өндіруге негізделген, ал бұл елдердегі көмір қоры өте үлкен. Мұнайды жаһандық тұтыну мөлшері негізінен Азия-Тынық мұхиты аймағындағы елдердің есебінен өсетін болады, олардың экономикасы өсу үстінде; оған қоса, мұнай

өнімдерін тұтыну Еуропалық Одаққа кіретін Шығыс Еуропа елдері есебінен өсетін болады, ондағы жан басына шаққандағы тұтыну мөлшері Батыс Еуропа елдеріндегі көрсеткіштерге жақындайтын болады; мұнай өнімдерін тұтыну мөлшерінің өсу мүмкіндігі ОПЕК құрамындағы елдерде барынша қысқа жолмен жеткізілетін, оңай алынатын жоғары сапалы сұйық отын қорының болуымен расталып отыр [8, 9].

Төмендегі себептер алдағы 20 жыл (2020-2040жж.) ішінде газды тұтыну мөлшерінің бір жарым есе артуына кедергі келтіруі мүмкін [10]:

– Экономикалық ынтимақтастық және даму ұйымына (ЭЫДҰ) кіретін батыс Еуропа елдеріне газды қосымша тасымалдау қажет болмауы да ықтимал, себебі ол елдерде тұтынатын табиғи газының 40% Ресейге (жалпы әлем деңгейінің 22% астамы шығарылады) байланған, халық саны өспей тұрған, экономикасының және тұрғын үй-коммуналдық шаруашылығы дамудың жоғарғы деңгейіне жеткен;

– Шығыс Еуропа аймағындағы елдердегі газ бағасы тұрақты түрде өсіп келе жатқандықтан, оның тұтыну мөлшерін шектеуге мәжбүр болады;

– Ресей Батыс Сібірдегі газ ұңғымалары таусылғанда және Арктикада (Штокомановск, Приразломное және т.б.) орналасқан жаңа кен орындарын игеруге материалдық және технологиялық қорлары шектеліп, ішкі тұтыну мөлшері артқан кезде Еуропаға газ жеткізу мөлшерін ұлғайтуға қауқарсыз болып қалады;

– газ бағасының өсуі батыс серіктестерді дәстүрлі емес энергия көздерін қарқынды түрде пайдалануға ынталандыратын болады, сондай-ақ қазірдің өзінде ынталандырып жатыр;

– газды Ираннан жеткізу, белгілі саяси себептерге байланысты, сенімсіздік тудырады (Иран әлемдегі газ қоры бойынша екінші орында тұрған мемлекет).

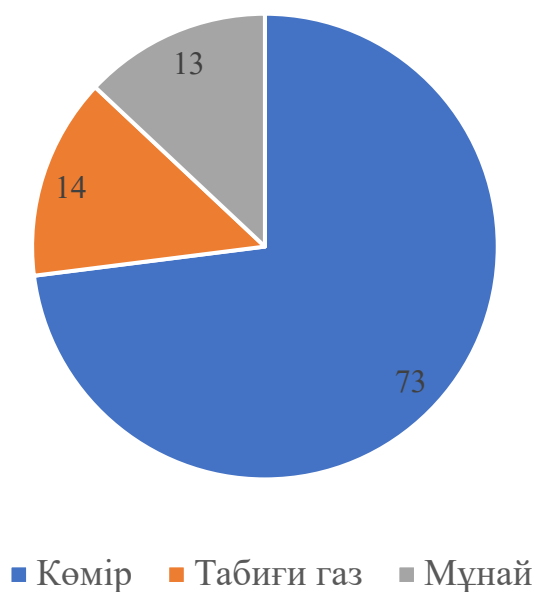
Электр энергиясын өндіру кезінде ядролық отынды пайдалануды мөлшерін өзгеріссіз қалдыру немесе азайту үшін алдағы 20 жыл ішінде реакторларды пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз етуге, АЭС тиімділігін арттыруға, пайдаланылған отынды қайта өңдеу және көму мәселелерін шешуге байланысты болады.

Су қорларын пайдалану 20 жыл ішінде әлемдік ауқымда 1,3 есе арттырудың ықтималдығы аз, алайда кейбір елдер (Қытай, Оңтүстік Америка елдері) ГЭС салуға бейімделген. ЭЫДҰ-ға кіретін Норвегия сияқты елдер өздерінің гидроэнергетикалық әлеуетін пайдаланды.

Болашақта, органикалық отынның алуан түрлері негізгі энергия қорлары болып қала бермек. Органикалық отынның әлемдік қорының құрылымы 1.1.1-суретте келтірілген [11–13].

Тұтастай алғанда, отынның әрбір түрі, жекелеген аймақтарға топтастырылған елдер бойынша келешектегі қажеттілігінің құрамын алып қарайық.

Үш мың жыл бұрын қытайлықтар тас көмірін тауып алып, соны отын түрінде пайдалануды бастаған. XIII ғасырда Марко Поло, Қытайға жасаған саяхаттан оралып, көмірді батыс әлеміне ұсынды. Бүгінгі күні көмірсутек отыны – энергияның басты көзі және жақын он жылдықта осылай болып қала бермек.



1.1.1-сурет. Органикалық отынның әлемдік қорының құрылымы (%) [11–13]

Көмірдің барланған қоры 1 трлн. тонна шамасын құрайды, яғни қазіргі кездегі өндіру деңгейі бойынша адамзат көмірмен екі-ақ ғасырға қамтамасыз етілген. Бұл ретте көмір қорын барлап, резервтерді молайтудың мүмкіндігі бар [14,15].

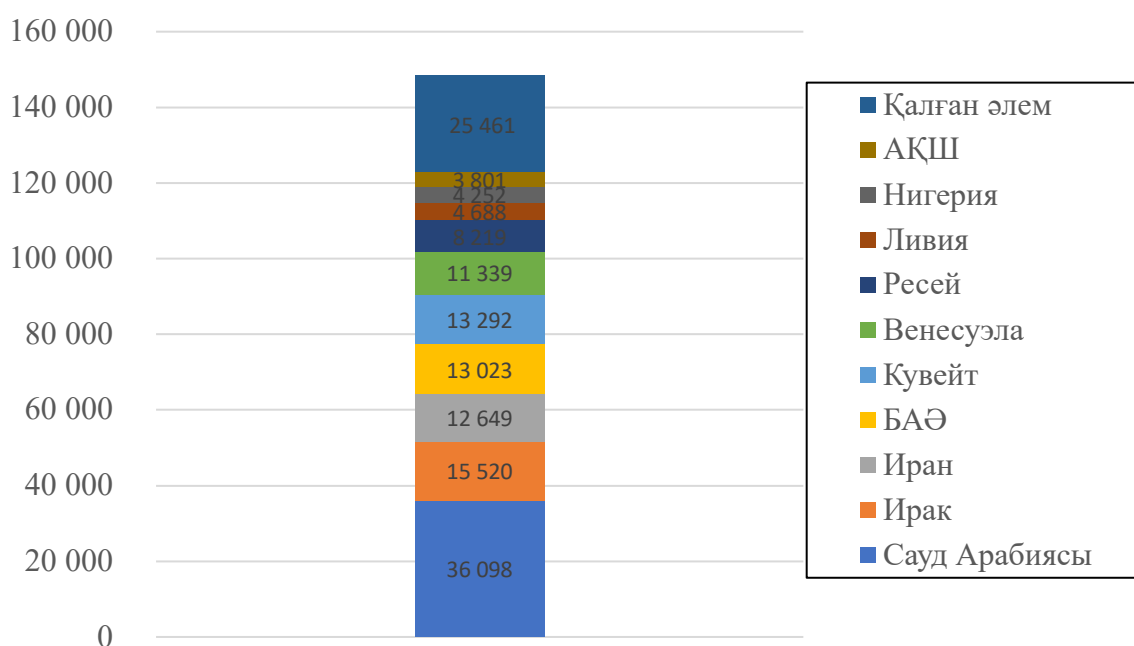
Бағалау деректеріне сүйенсек, бастапқы энергияны болжанып отырған интегралды тұтыну мөлшері осы ғасырдың бірінші жартысында 30 мың ЭДж құрайды екен (ғасыр соңына дейін тұтынылатын энергияның жиынтық мөлшері «орташа» сценарийге сәйкес,  $(80-100) \cdot 10^3$  ЭДж құрайтын болады. Өндіру құны ағымдағы бағадан 5-10 артық болатын көмір мен мұнайдың ең қымбат санаттарын ескермеген жағдайда, қазбалы отынның қорлары аталған қажеттіліктерді толықтай қанағаттандырады.

XXI ғасырда мұнай мен газды пайдалануға қатысты айтар болсақ, онда ең ортақ әлемдік үдерістер осы ғасырдың соңына дейін мұнайдың қолжетімді ресурсын тауысуды және дәл осындай кезең ішінде газ өндірудің ең жоғарғы деңгейіне жетуді көздейді. Болжамға сай, ғасыр соңында мұнай синтетикалық отынмен (ең алдымен көмірмен) және сутекпен қарқынды түрде алмастырылатын болады. Жалпы алғанда, органикалық отын дәуірі адамзат өркениетінің анағұрлым ұзақ кезеңін құрап отырған жоқ.

Қазіргі уақытта әлемде өңделген мұнай өнімдерін пайдалануды арттыру белең алып тұрғаны байқалады. ХХІ ғасырдың басында әлемдегі мұнайдың жылдық тұтыну көлемі 3,5 млрд. т асып жығылды, ал 2017ж. – 4,0 млрд. т. құрады, бұл кезде мұнайдың халықаралық бағасы едәуір өскен және салыстырмалы бағалар құрылымында мұнай құны артқан (әлемдік қаржы дағдарысы алдында).

2020 жылғы мәлімет бойынша елдердегі мұнайдың дәлелденген қорлары туралы ақпарат 1.1.2-суретте берілген [12,16]. Бірқатар шетелдік сарапшылар Канада, Вьетнам және Ұлыбританияның барланған мұнай қорлары мұнай өндірісінің қазіргі қарқынмен 6 жылдан кейін таусылып қалуы мүмкін деп отыр. Норвегияның қоры 8 жылдан кейін таусылады, АҚШ – 11, Түркменстан – 12, Ресей – 19, Қазақстан – 27, Мексика – 21, Нигерия – 31, Катар – 55. Сауд Аравия кен орындары 85 жылға жетуі тиіс, БАӘ – 114, Кувейт – 127, Ирак – 128. Бұл ретте әлемдегі қолжетімді мұнай көздерінің 95% жақын болашақтағы 56 жылда, қалған 5% 88 жылдан соң таусылады. Арктиканың мұнай қорына үміт арту жоспары көптеген себептерге байланысты бұлыңғыр болып табылады.

РФ Табиғат министрлігінің деректері бойынша мұнайдың пайдалы қоры бақыланып отырған Ресей мұнайын шығару қарқынымен 20-30 жылға жетеді [17, 18].



1.1.2-сурет. 2020 жылғы жағдай бойынша елдердегі мұнайдың дәлелденген қоры (миллиард тоннамен берілген) [12, 16]

Халықаралық энергетика агенттігі әлем 5 жылдан кейін мұнай резервтерінің дағдарысына ұшырайды, соның кесірінен бағалар рекордтық жоғары деңгейге жетеді (болжам әлемдік қаржы дағдарысына дейін жасалды), ал Батыстың ОПЕК мұнай картеліне тәуелділігін артатын болады деп есептейді.

Халықаралық энергетикалық агенттік (IEA) болжамы бойынша алғашқы энергия қорларына деген әлемдік қажеттілік 2025 – 2030 жж. аралығында 55%-ға ұлғаяды, өсімнің орташа жылдық қарқыны 1,8%-ды құрайтын болады [13].

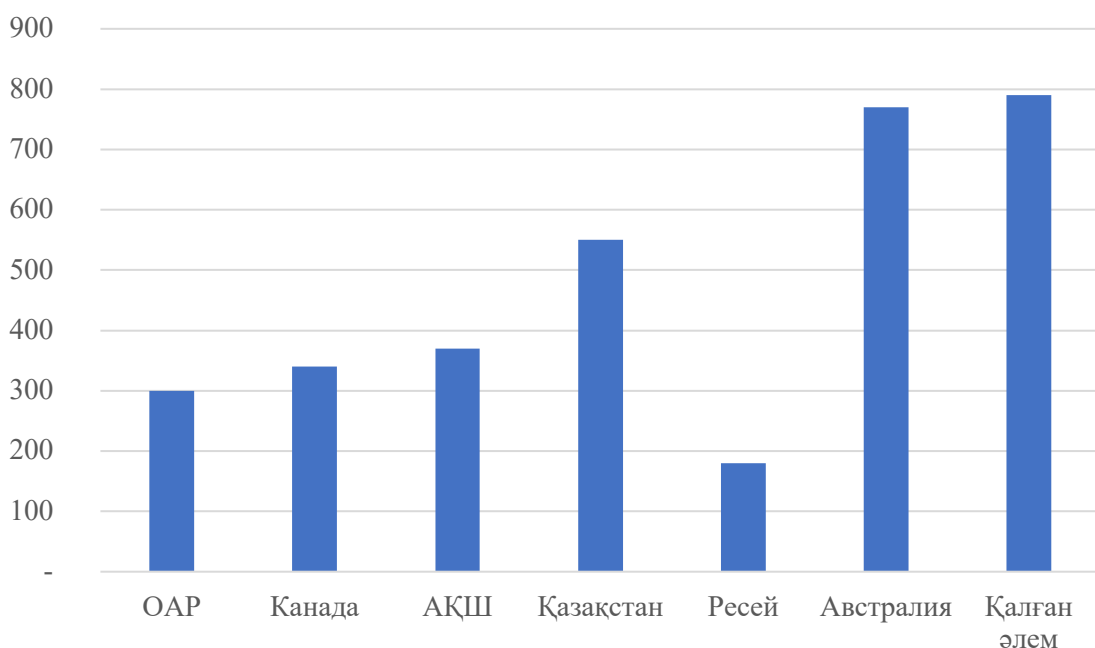
Табиғи газдың электр энергетикасын пайдаланудың көзделу себебі түсінікті әрі айқын: технология жағынан пайдалану ыңғайлы, экологиялық таза, бағасы да арзан, яғни, барлық жағынан алып қарағанда кез келген органикалық отын түрлерінің алдында басым болып тұр. Тұрмыстық секторға қатысты айтар болсақ, онда табиғи газды пайдаланудан еш артығы жоқ. 1.1.2-кестенің деректерінен көргеніміздей, әлемнің энергия балансында 2050 жылға қарай мұнай мен көмір үлесінің азаю үдерісі кезінде табиғи газды пайдалану пайызы тұрақты болады. Бұл ретте табиғи газға сұраныстың тез өсетіндігі көрінеді (2000-2020 жж. аралығында шамамен 28% құрады) [15].

Кесте 1.1.2– Отын-энергетикалық қорларды пайдалану [14, 15]

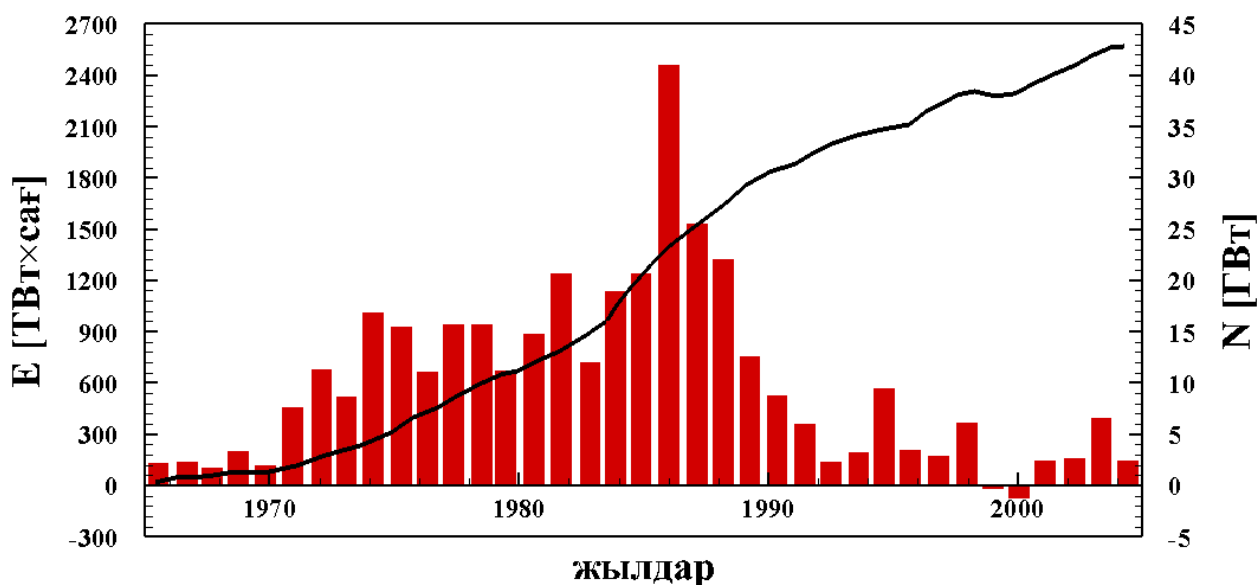
Қорлар	Сұраныстың өзгеруі, %, жылдар бойынша			
	1990	2000	2020	2050
Мұнай	43	38	28	20
Табиғи газ	19	23	23	23
Көмір	28	27	25	21
Ядролық отын	5	6	7	14
Жаңартылатын энергия көздері, соның ішінде гидроэнергия	5	6	17	22
Барлығы	100	100	100	100

Атом энергетикасы. Экономика тұрғысынан дәлелденген өндірілетін уранның әлемдік қоры 4,2 млн. Т, олардың жалпы қоры шамамен 9,8 млн. тонна [2]. Уран кен орындары барлық континентте және әлемнің көптеген елдерінде бар (47 ел өздерінде уран кенінің үлкен қоры бар екенін мәлімдеген). Уранның ірі қоры Австралия, Канада, АҚШ, ОАР, Қазақстан, Ресей және Өзбекстан елдерінде орналасқан. 1.1.3-суретте уранның өндіруге экономикалық тұрғыдан дәлелденген қоры жекелеген елдер бойынша таратылып көрсетілген [19].

Уран өндірісінің көшбасшысы – Канада мен Австралия. Алынған және өңдеуден өткен уран 31 елдегі 442 энергия блоктарында пайдаланылып, әлемдік электр энергиясының 16% өндірісін қамтамасыз етіп тұр. Бұл үлес өткен ғасырдың 80 жылдарының ортасынан бастап еш өзгеріссіз қалып келеді, бұл деген ядролық және бүкіл әлемдік энергетика өсімінің қарқыны бірдей екенін көрсетеді. 1.1.4-суреттен көріп тұрғанымыздай, әлемнің барлық еліндегі АЭС-тегі қуатты арттыру 1986 жылы шыңына жеткен және Чернобыль апатынан кейін күрт төмендеп кеткен. Оған қоса, 1988-1989 жж. Блоктарды пайдаланудан шығару үлесі жаңа блоктарды енгізу үлесінен артқан. Сонымен қатар АЭС-тегі электр энергиясының өнімділігінің өсу үдерісі айқын болған [20].



1.1.3-сурет. Өндірісі экономикалық негізделген уран қорының үлесі, (мың тонна)



1.1.4-сурет. Қуат кірісі және АЭС-тегі электр энергиясының өнімділігі

Осы қазба отындарын және атом энергетикасын пайдалану талдамасымен шектеле отырып, жаңартылатын энергия көздері қорларының даму және өндіру жағдайын алып қарайық.

Жаңартылатын энергия көздері. Жуырдағы екі он жылдықта олардың рөлі артатыны сөзсіз, бірақ көмірсутек энергетикасына олар бәсекелес бола алмайды. ЭЫДҰ-ға мүше ең алдымен, зиянды заттарды ауа таратуды, соның ішінде CO<sub>2</sub>, азайту қажеттілігіне байланысты, ал қазіргі уақытта табиғи газ жеткізудің ықтимал үзілістеріне ішінара балама ретінде елдерде жел генераторларын

пайдалануға және биомассаны қайта өңдеуге көңіл бөлініп отыр. Жеткілікті деңгейдегі қарқынды өсімге қарамастан, 2050 жылға қарай әлемде жаңартылатын энергия көздерінің үлесі бар болғаны 3-5%-ға өседі деп есептеледі және осы өсімнің барлығы ЭЫДҰ-ға мүше елдерде ғана байқалады, онда оптимистік болжамдар бойынша олардың генерациясының үлесін 2050 жылға қарай 20%-ға жеткізу көзделіп отыр (Дания мен Швецияда бұл үлес мөлшеріне жетіп қойған) [21, 22].

Жекелеген Еуропа елдері 2050 жылдарға қарай энергетикалық баланстың 50-65%-ын балама энергия көздерімен қамтамасыз етуге ниетті. Қазіргі уақытта 50-ден астам елде жаңартылатын энергия көздерін әзірлеу және игеру бойынша мемлекеттік бағдарламалар қабылданған, оларды жүзеге асыруға кететін шығын қазірдің өзінде 100 млрд. доллардан асады. Осыған қарап, осы уақытқа дейін басым болып келген мұнай-газ туралы ойлау стереотиптері біртіндеп ұзартылып келеді.

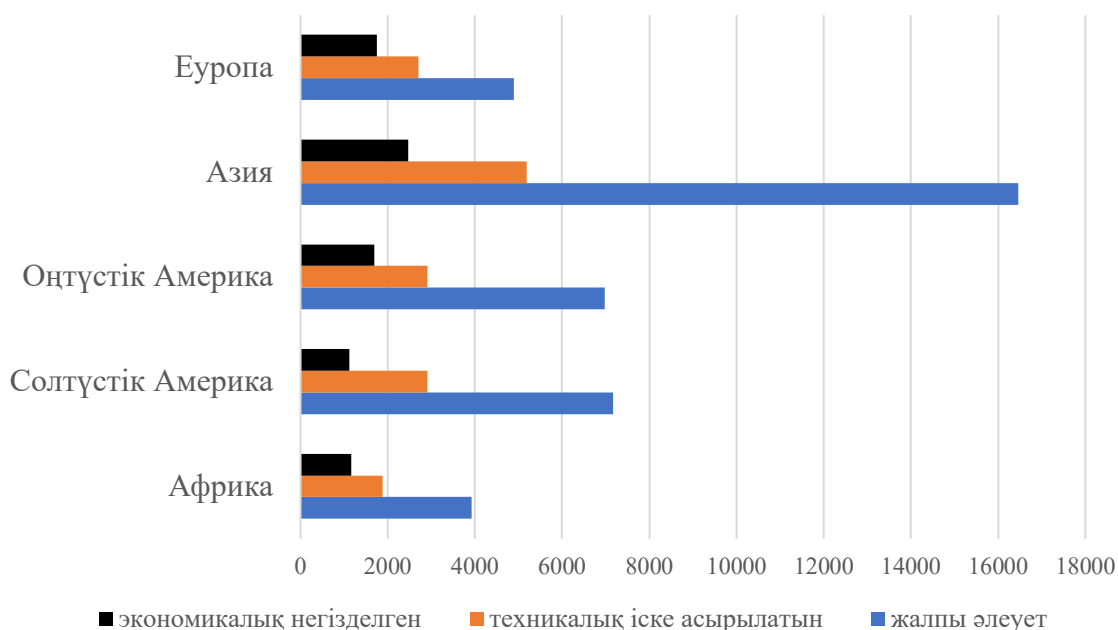
Келешекте 2050 жылға дейін әлемдегі электр энергиясының 50% органикалық отын арқылы өндірілетін болады (іс жүзінде бұл соңғы 10 жылдың пайызы) [23].

Жаңартылатын энергия көздерінің (ЖЭК) әлеуетін қарастыра отырып, алып теориялық қорларға сүйеніп, шешім қабылдауға болады: Жер бетіне жыл сайын түсетін күн энергиясы мөлшері шамамен 2.5 млн. ЭДж [24] (барлық мұхитта жиналған газогидраттардан үш есе көп). Күн радиациясының ширегінің өзі кинетикалық жел энергиясына айналады. Жердің геотермалды энергиясынан (3 км тереңдікке дейін) теориялық ресурс он еседен астам көп. Олар таусылмайды деуге де болады, олардың тек шағын бөлігін ғана іс жүзінде пайдалануға болады. Бұл ЖЭК-ті игеру маңыздылығын саяси тұрғыдан ұғынудың жеткіліксіз болуына, көптеген елдердің ЖЭК пайдалану технологиялық әзірлеуге дайын болмауына, энергетиканың осы саласындағы инфрақұрылымның жоқтығына және индустриясы дамыған елдердің өзінде халық пен үкіметтің балама энергетикаға көшуге психологиялық тұрғыдан дайын болмауына байланысты.

Әлемдегі ЖЭК-тің жиынтық экономикалық қорлары, яғни игерілуі экономикалық тұрғыдан ақталатын пайдалануға жарамды әлеуетінің бөлігі, ~50 мың ЭДж құрайды және ғасыр ортасына дейінгі электр энергиясының қажеттілігінен шамамен 10 есе артық (1.1.3-кесте) [4]. Өкінішке орай, қазіргі уақытта осы қорлардың ширегіне жуығы салыстырмалы түрде арзан және олардың тек 5%-ы бүгінгі таңда бәсекеге қабілетті - бұл гидро және жел энергиясының ең арзан түрі. Дегенмен жаңартылатын қорлар адамзатқа шынымен қолжетімді болуы үшін алып зияткерлік күш пен материалдық шығындар қажет болады.

Гидроэнергетика әлемнің бастапқы қорларға деген қажеттілігінің бар болғаны 2,3%-ын қанағаттандырады және электр энергиясының 14,8% өндіреді [25]. Гидроресурстарға бай елдерге АҚШ, Конго, Канада, Бразилия жатады. Пайдаланылмайтын гидроэнергетикалық әлеуеттің негізгі бөлігі үшінші әлем елдеріне негізделген. Осы елдердегі өзендерден өндіруге болатын электр

энергиясының 75%-ы әлі игерілмеген. ЭЫДҰ-ға мүше елдерде жағдай басқа, онда гидроэнергетикалық әлеует пайдаланылып тұр немесе 88%-дан астамы игерілу үстінде. 1.1.5-сурет әлем аймақтары бойынша берілген гидроэнергетикалық қорларды техникалық тұрғыдан іске асырылатын және экономикалық тұрғыдан пайдалануға негізделген жалпы әлеуеттің арақатынасын көрсетеді.

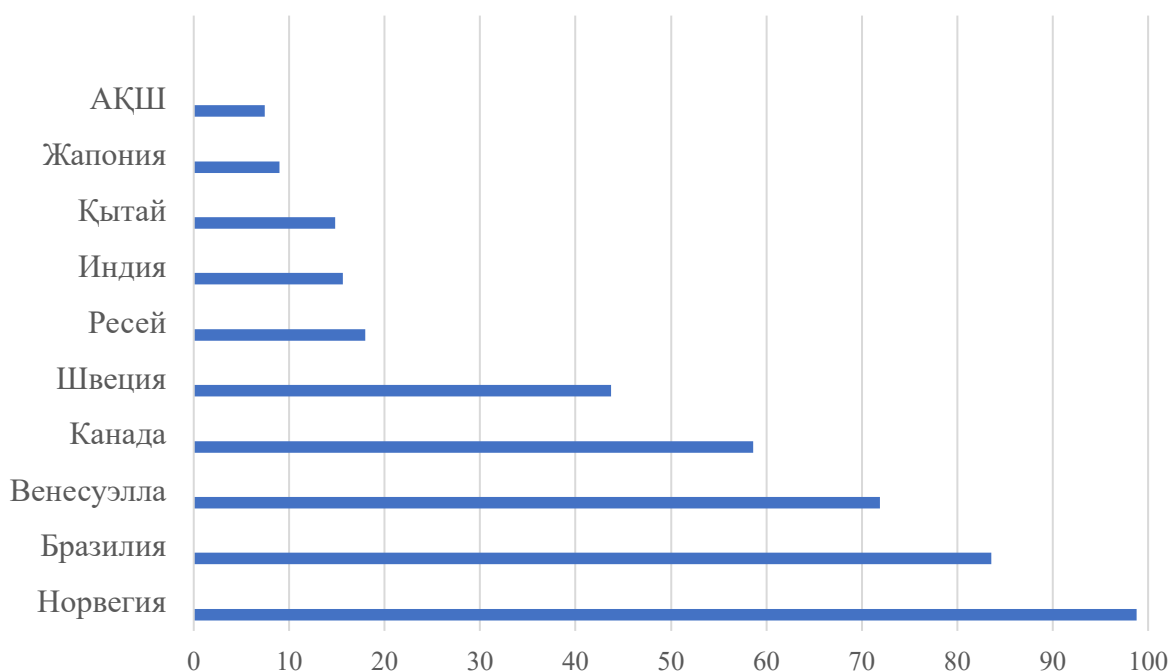


1.1.5-сурет. Аймақтар бойынша бөлінген гидроэнергетикалық қорлардың жылына миллиард киловатт-сағатпен берілген әлеуеті [25]

Қазіргі таңда ГЭС-тегі электр энергиясы өндірісінің 46,7% Қытай, Канада, Бразилия мен АҚШ-қа тиесілі. ГЭС-те электр энергиясын көп өндіретін кейбір елдер 1.1.6-суретте көрсетілген [26, 27]. Он көшбасшы елдің электр энергиясының өндірісі және 2016 жылы әлемдік өндірістегі әр елдің үлесі 1.1.3-кестеде келтірілген.

Күн энергетикасы - әлемдегі энергетиканың жылына 53% өсу қарқыны бар және 2019 жылғы өндіріс көлемі 14,7 ГВт жеткен, энергетиканың ең тез өсіп келе жатқан саласы. Қуаты 1980 жылдан бері 354 МВт құраған Калифорниядағы концентраторлары бар күн электр станциялары жыл сайын 2 миллион баррель мұнайды алмастырады [28, 29]. Көптеген елдегі физиктер мен технологиялар жаппай өнеркәсіптік мақсатта өндіруге жарамды, ПӘК 20% құрайтын үшінші буынды фотоэлектр кремний модульдерін (ФКМ) жасау үстінде. Қазіргі уақытта Ресейдегі және шетелдердегі барлық зауыт жазық күн элементтері негізіндегі ФКМ шығарып жатыр, олардың ПӘК-і 14-16%. ФКМ күн элементтерінің (КЭ) әлемдік өндірісінің 90% құрайды [30].





1.1.6-сурет. Елдер бойынша бөлінген ГЭС-те өндірілетін электр энергиясының үлесі (%) [25].

Кесте 1.1.3 – Электр энергиясын өндіру [26, 27]

Елдер	Электр энергиясының өндірісі, млрд.кВт с	Әлемдік өндірістегі үлесі, %
АҚШ	4274	22,6
ҚХР	2864	15,1
Жапония	1091	5,8
Ресей	994	5,3
Үндістан	744	3,9
Германия	629	3,3
Канада	612	3,2
Франция	569	3
Бразилия	419	2,2
Корея	402	2,1
Қалған әлем	6332	33,5
Бүкіл әлем	18930	100

2005 – 2011 жылдар аралығында күннен өндірілген энергияның көлемі 24 есе артты (1.1.4-кесте). Алайда, өндірістің өсімі айтарлықтай өзгерген жоқ. Модульдердің бағасы 17% пайызға арзандаса, белгіленген қуаттың орташа құны 7,1 АҚШ долларынан 5,66 долларға дейін арзандады. Нәтижесінде жылдық сатылым көлемі және салықтар төлегенге дейінгі таза пайда, сәйкесінше, 19 есе және 25 есеге артты. Демек, күн энергетикасының негізгі баламалы энергия қорларының бірі болуы тек уақыт еншісінде.

1.1.4 кесте – Әлемдік күн энергетикасы нарығы [26, 27]

Атауы	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Өндіріс көлемі, ГВт	1,7	2,6	3,9	7,9	14,7	28,8	40,9
Өндіріс өсімі, %	44	58	50	82	107	96	42
Модульдердің орташа бағасы, долл./Вт	3,7	4,21	3,97	4,18	3,73	3,33	3,06
Белгіленген қуаттың орташа бағасы, долл./Вт	7,1	7,67	7,43	7,56	6,74	6,05	5,66
Жылдық сатылым көлемі, млрд.долл.	12	17,9	26,6	50,7	96	170,5	228,3
Салықтар төленгенге дейінгі пайда, млрд.долл.	3	5,3	7,8	17,4	32,6	56,3	73,7

## 1.2 Дүниежүзінде жаңартылатын энергия көздерінің даму тенденциялары

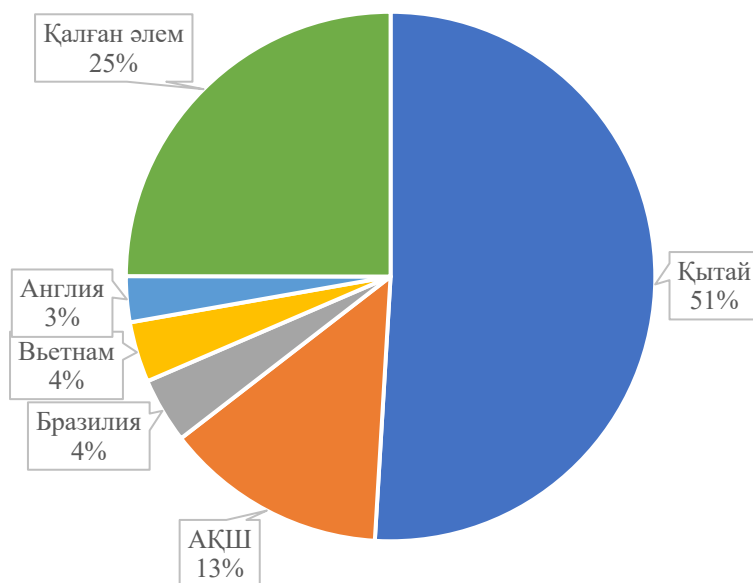
Жоғарыда келтірілген мәліметтерге сүйенетін болсақ, адамзат экологиялық таза және жаңартылатын энергия көзіне көңіл бөлу қажеттілігін түсінді.

Энергия, оның ішінде, электр энергиясы бұл өнеркәсіптің артериясы болып саналады. Әр ел өзінің энергетикалық әлеуетін арттыра отырып, өзінің энергетикалық қауіпсіздігі үшін күресуде.

Адамзат өткен ғасырдың 70-ші жылдарының басында ЖЭК пайдалануды бастады. Бүкіл әлемде энергияны тұтыну мөлшерінің артуына байланысты туындаған «энергетикалық дағдарыс» жылдары, дәстүрлі энергия қорларының қоры біртіндеп азаяды және сұйық отын бағасының өсе бастауына байланысты, көптеген елде жаңартылатын энергия көздерін, ең алдымен күн, жел, Жер қойнауы жылуын және т.б. пайдалану жұмыстары күрт өсе бастады [6, 9]. Ұлттық энергетикалық бағдарламаларға сәйкес жаңа, аса тиімді жел қондырғылары мен станциялары жасалды, жаңа конструкциялары әзірленуде және жел энергиясын электрлік, химиялық энергияға және жылуға айналдыратын үнемді технологиялар ізделініп жатыр.

Шамамен 1975 жылдан бастап көптеген елде пайдаланылып келген жел қондырғыларының саны арта бастады. Бұл ЖЭК-ті кеңінен пайдалану үдерісі үздіксіз қарқын алып келеді. АҚШ, Германия сияқты, соңғы кездері Қытай сияқты жетекші елдердің жел энергиясын пайдалану қарқыны үдеп келеді. Олардан Канада, Үндістан, Дания және т.б. елдер де қалыспай келеді [31, 32].

2021 жылы әлем бойынша ЖЭС-тің жаңадан ортанылған қуаты 93,6 ГВт құрады, ол 2020 жылмен салыстырғанда 1,8% кем. ЖЭС орнатылған қуаттардың үлесі 1.2.1-суретте берілген. Оған сәйкес бүкіл жаңа қуаттың 51% Қытай, 13,6% АҚШ; 4% Бразилия, 3,7% Вьетнам, 2,8% Англия, 25% қалған әлем елдеріне тиесілі.



1.2.1-сурет. 2021 жылы жаңадан орнатылған ЖЭС қуаттардың үлесі [31,32]

Даниялық Vestas Wind Systems A/S (CPH:VWS) компаниясы 2019 жыл қорытындысы бойынша жел агрегаттарының ірі өндірушілерінің тізімінде көшбасшы орнын сақтап қалды, оның үлесі 32,5% болды, Данияның BTM Consult белгілі рейтингтік және кеңестік агенттігі мәлімдегендей, Америкалық GE Energy, индустриалдық алпауыт General Electric (NYSE: GE) үлесі көшбасшыдан тек 25 МВт кем болған. Тізімде олардан кейін қытайлық Sinovel 9,2% үлесімен, немістің Enercon 8,5% үлесімен және қытайлық Goldwind 7,2% үлесімен жайғасқан (1.2.1-кесте).

1.2.1 кесте – 2019 жыл қорытындылары бойынша әлемде ЖЭҚ өндіру бойынша көш бастаған компаниялар [31, 32]

№	Компания	Елдер	% мөлшері
1.	Vestas	Дания	12.5
2.	GE	АҚШ	12.4
3.	Sinovel	Қытай	9.2
4.	Enercon	Германия	8.5
5.	Goldwind	Қытай	7.2
6.	Gamesa	Испания	6.7
7.	Dongfang	Қытай	6.5
8.	Suzlon	Үндістан	6.4
9.	Siemens	Германия	5.9
10.	RePower	Германия	3.4

2019 жылы жел энергетикасы нарығының айқын «басым иесі» қытайлық Sinovel, Goldwind және Dongfang болды, олар BTM Consult агенттігінің 10 ірі өндірушілерінің рейтингінде болған.

Былырғы тұрақты көшбасшылардың кейбірі өздерінің көшбасшы орындарын Қытай компанияларына берді. Тізімде Қытай компанияларының пайда болуы әлбетте қытайлық жел индустриясы нарығының күрт өсуімен байланысты.

Бүгінгі таңда әлемдік энергия өндірісінде баламалы энергия көздерінің үлесі 18,2% құрайды, оның ішінде жел энергиясының үлесі 2%-дан астам. 2030 жылға қарай электр энергиясы өндірісінде жел энергиясының үлесі 10% жетеді деп сенімді түрде айтуға негіз бар.

Бүкіл әлемдік жел энергетикасы ассоциациясы [33] өзінің 2019 жылға арналған әлемдегі жел энергетикасының даму қорытындысы туралы жыл сайынғы есебін жариялады (1.2.2-кесте). Жел энергетикасы 2020 жылы өзінің кезекті рекордын орнатты, жел станцияларының жалпы белгіленген қуаты 157899 МВт жеткен, бұл 2019 жылға қарағанда 38,31МВт артық. Жел энергетикасы 2019 жылы өсім 31,7% болғанын көрсетті, бұл 2011 жылдан кейінгі ең жоғарғы өсім. Әлемде орнатылған барлық жел агрегаттары жылдық есеп бойынша шамамен 340 ТВт электр энергиясын өндіреді. Әлемдегі жел энергетикасы секторының айналымы 2019 жылы 50 млрд еуроны құрады. Осы секторда жұмыс істейтін адам саны 2019 жыл соңында 550000 адамды құрады. 2030 жылға қарай бұл көрсеткіш 1 млн. астам жұмыс орнын құрайды деп болжануда.

1.2.2 кесте – ЖЭС-тің жеткен және жоспарланған үлесі (елдердің жиынтық электрогенерациясына %-бен) [33]

Ел\жыл	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2015	2020	2025	2030
Дания	4,29	7,15	11,65	14,78	15,73	16,47	16,88		20,0		
Германия	0,52	0,91	1,90	3,77	5,29	6,64	7,78		25,0		
Италия	0,03	0,12	0,27	0,52	0,83	1,41	2,51		10,0		
Нидерланды	0,59	0,75	0,90	1,41	2,11	3,15	4,73		10,0		
Ұлыбритания	0,11	0,16	0,19	0,26	0,42	0,93	1,56		10,0		
Франция		0,0	0,02	0,05	0,13	0,53	1,17		10,0		
Португалия	0,07	0,20	0,32	0,63	1,28	4,32	9,62				
Польша		0,00	0,01	0,08	0,09	0,20	0,63		13,0		
Швеция		0,06	0,22	0,39	0,57	0,75	1,36		10,0		
Түркия		0,0	0,03	0,03	0,03	0,07	0,61		8,0		
АҚШ	0,09	0,09	0,12	0,22	0,32	0,56	1,24				20,0
Канада	0,01	0,03	0,05	0,08	0,15	0,50	0,83			20,0	
Қытай	0,0	0,02	0,03	0,04	0,07	0,24	1,12	4,0	8,0		
Үндістан	0,23	0,33	0,40	0,56	1,00	2,12	3,30				8,0
Жапония	0,0	0,01	0,02	0,06	0,15	0,24	0,35	2,0	5,0		
Австралия			0,02	0,08	0,29	0,64	1,03		5,0		
Бразилия				0,01	0,01	0,12	0,17				20,0
Ресей	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,0		7,0

Бүкіл әлемдік жел энергетикасы қауымдастығы әлемдегі ЖЭС қуатының осындай қарқынды өсуіне байланысты өзінің 2020 жылға жасаған болжамын қайта қарап, оны 1 900 000 МВт-қа дейін арттырып өзгертті.

Жаңартылатын энергетиканың дамуында болашағы бар бағыттардың бірі — жел энергетикасы. Жел энергиясын пайдалану қашықтағы нысандарды және қала сыртындағы үйлерді электр қуатымен қамтамасыз етуге қатысты көптеген мәселелерді шешуге және жергілікті энергиямен қамтушы ұйымдардан тәуелсіз болуға мүмкіндік береді. Өз жер телімінде дизель генератордың немесе бензоэлектр станциясының орнына шағын жел генераторын орнатып қойып, табиғатты сақтау ісіне, зиянды заттардың және парниктік газдардың атмосфераға таралуын азайту және климаттың өзгеруін тоқтату ісіне өз үлесінді қосуға болады.

БҰҰ есебіне сәйкес 2019 жылы бүкіл әлемде балама энергетикаға байланысты жобаларға 140 млрд. доллар инвестиция құйылған, ал көмір мен мұнай өндірісіне 110 млрд. доллар құйылған [34].

Бүкіл әлемде 2015 жылы жел энергетикасына \$51,8 млрд инвестиция салынған. Еуропа елдері 2019 жылы балама энергетикаға \$50 млрд, Америка елдері — \$30 млрд, Қытай — \$15,6 млрд, Үндістан — \$4,1 млрд инвестиция құйған. Еуропа комиссиясының бағасы бойынша 2020 жылға қарай тек Еуроодаққа мүше елдердің өзінде жаңартылатын энергетика индустриясында 2,8 миллион жұмыс орны құрылмақ.

Шет елде жел энергетикасы әлемнің жекелеген аудандарында электр энергиясын өндіруге елеулі үлес қосатын электр энергетикасының маңызды саласы ретінде бұрыннан бар. Мұның себебі, АҚШ-та жаңартылатын энергия көздерін пайдалануды ынталандыру бойынша түрлі іс-шаралар 80-жылдардың басынан бастап федералды деңгейде де, штат деңгейінде де жүргізіле бастады. Кейбір штаттарда, мысалы, энергия өндіретін компанияларды электр энергиясының белгілі бір бөлігін жаңартылатын энергия көздерінен өндіруге міндеттейтін заңдар бар [35]. 1992 жылғы АҚШ-тың Энергетикалық саясат туралы заңы энергия үнемдейтін компанияларға 1 кВт/сағ үшін 1,5 цент көлемінде салықтан уақытша босату мүмкіндігі берілген. Жел электр станцияларын пайдаланатын және электр энергиясын тұтынушыларға өз желілері арқылы немесе электр жүйесінің желілері арқылы тарататын жел электр станциялары иелеріне уақытша салықтан босату мүмкіндігі берілді.

Тағы бір мысал, Германияда 1991 жылы қабылданған [6, 9] электр қуатымен жабдықтау туралы заң жаңартылатын энергетика көздерін пайдалану есебінен өндірілген электр энергиясын орташа құнының 90% шегінде төлеуге рұқсат береді. Ал 1993 жылы «Эльдорадо Жел» бағдарламасы, қабылданды, ол ЖЭК өндірісіне тікелей мемлекеттік инвестиция салуды қарастырған. Бұл салық жеңілдіктерімен бірге жеке капиталды да тартты, сонымен бірге ол капитал мөлшері үкіметтік инвестициялардан әлдеқайда артық болды. Нәтижесінде

«Эльдорадо Жел» бағдарламасы асыра орындалып, 90-шы жылдардың соңына қарай ЖЭҚ-тың жалпы қуаты 280МВт шамасынан 1600МВт дейін ұлғайды.

Данияда 1980 жылдан бастап үкіметтік субсидиялар ЖЭС жобаларына салынған жалпы инвестициялардың 30%-на дейінгі бөлігін құрады, сондай-ақ жел энергетикасы саласындағы нарықты көтермелеудің түрлі тетіктері қолданылады [6,9].

1989 жылдан бастап Данияның үкіметтік баға саясатының негізгі бағыты ЖЭС-те өндірілетін электр энергиясының бағасын төмендетуге және ЖЭҚ өндірісінің сапасын жақсартуды көздеді.

Жеке және кооперативті инвесторлар үшін қызығушылықты қолдау ретінде бірнеше жыл бойы электр энергиясының бағасын сақтау туралы келісім жасалды. Акционерлік электр компаниялары электр энергиясын жергілікті тарифтің 85%-на сата алады, сонымен қатар пайыздарды мемлекеттік субсидиялар ретінде алады.

Үндістанда тоғыз штаттың 23 жерінде жалпы қуаты 50 МВт құрайтын ЖЭС көрсету жобалары жүзеге асырылды. Бұл жобаларды 70-90% қаржыландыруды Орталық үкімет жүзеге асырды, ал қалғанын штаттардың үкіметтері орындады. Үндістан үкіметі жел энергетикасын дамытуды ынталандыратын бірнеше заңдар енгізді: 5 жылға салықтан босату, 100% жеделдетілген амортизация, жеке компоненттерге жеңілдігі бар кедендік баж салығы және бүкіл жел қондырғысына 25% жеңілдік. Сонымен қатар штаттардың үкіметі жел электр станцияларында өндірілетін электр энергиясына дотациялар орнатуды ұсынды [6, 9].

1987 жылдан бастап Үндістанның дәстүрлі емес энергия көздері министрлігінің жанында Үндістанның жаңартылатын энергияны дамыту жөніндегі агенттігі (IREDA) жұмыс істей бастады. Қазіргі кезде IREDA дәстүрлі емес энергетика жобаларына инвестицияны тұрақты түрде арттырып келе жатқан фирма.

Нидерландыда жел энергиясын пайдаланудың негізгі артықшылығы CO<sub>2</sub> шығарындысының ауаға таралуын азайту.

Дәстүрлі емес энергетика саласындағы, соның ішінде жел энергетикасы саласындағы техникалық саясатты, Нидерландыда Экономика министрлігі үйлестіреді. Жел энергетикасы мәселелерімен Петтене қаласындағы Нидерланды ғылыми энергетикалық орталығы (ESN), Твенте қ. университет және Эйндховен техникалық университеті айналысады. ЖЭҚ қауіпсіздігі мәселелеріне Арнем қаласындағы Электр техникалық жабдық инспекциясы жетекшілік етеді.

Нидерландыдағы жел энергетикасы саласындағы ҒЗТҚЖ жаңа заманғы ЖЭҚ жасауға бағытталған, оның үшінші мыңжылдықтың басында өндірістегі құны 30% төмендер еді. Нидерландыда жел энергетикасы мемлекеттің қаржылық қолдауы және коммерциялық компаниялардың инновациялары арқасында жақсы дамып келе жатыр [6, 9].

Қытайдағы жел энергетикасын дамыту бағдарламасы үкіметтің толық қолдауымен жүзеге асырылып жатыр.

Жоғарыда айтылғандарға қарап, келесідей тұжырым жасауға болады. Алдыңғы қатарлы шет елдерде жел энергетикасы мемлекеттің мақсатты түрде қолдау көрсетуінің арқасында қарқынды дамыды, қолдау әртүрлі тәсілдермен жүзеге асырылды:

- тікелей мемлекеттік инвестициялармен;
- салық жеңілдіктерімен;
- ЖЭҚ-пен өндірілген 1кВт электр энергиясына бағаны төмендетумен.

Осының арқасында жаңа материалдар мен конструкцияларды өңдеу бойынша көптеген ғылыми зерттеулер жасалды, сондай-ақ ЖЭҚ өндірісі күрт өсті (1.2.3-кесте).

2020 жылғы 9 желтоқсанда Еуропа Одағының (ЕО) 27 мемлекеті мен Еуропа парламенті Директиваны мақұлдады, оған сәйкес 2020 жылы ЕО-ға мүше елдер жаңартылатын энергия көздерінен жалпы қуаты 1370 ТВт.с құрайтын барлық электр энергиясын 33,6%-дан 40,4%-ға дейін өндіруге тиіс болған.

1.2.3 кесте – Еуропалық Одақ елдерінің энергия өндірісі [31,32]

	2005 ж.	2020 ж.
Жел энергетикасы, ТВт.с	82	477
Фотоэлектр энергетикасы, ТВт.с	2,5	180
Геотермалды энергетика, ТВт.с	5,6	31
Күн жылу электр станциялары, ТВт.с	0	43
Мұхиттан алынатын энергетика, ТВт.с	0	5

Мысалы, жуырда Еуропада әлемдегі ең ірі теңіз жел электр станциясы іске қосылды [20]. Швецияның Vattenfall энергетика компаниясы Англияның оңтүстік-шығыс жағалауында әлемдегі ең үлкен Thanet жел электр станциясын салды.

Жиынтық ең жоғарғы қуаты 300 МВт құрайтын жүз жел турбинасы 200 000 астам британиялық үйді қамтамасыз етуге қабілетті. Жел паркі Солтүстік теңіздегі алып аумақты алып жатыр, ол жағадан жеті миль (12 километр) қашықтықта орналасқан.

“Thanet” жел паркін ашу арқасында Ұлыбританияның 5 ГВт жел электр энергиясын өндіру мүмкіндігі пайда болды, шамамен энергияның осыншама мөлшері Шотландияның барлық үйін энергиямен қамтуға жеткілікті”, - деді станцияның ашылу салтанатына қатысқан энергетика министрі Крис Хун.

Әр Thanet турбинасының биіктігі 380 фут (115 м), электр станциясының жалпы ауданы 4 000 футбол алаңының өлшемімен сәйкес. Электр станциясы кемінде 25 жыл жұмыс істейді деп күтілуде.

Ұлыбритания жаңартылатын энергия көздерінен энергияның тек 3%-ын алады, бірақ осы үлесті 2020 жылы 15%-ға дейін жеткізуді көздеп отыр.

Экологтар Ұлыбритания үкіметінен Green Investment Bank инвестициялық банкі үшін жылына кем дегенде 2 миллиард фунт (\$3,1 миллиард) қаржыландыруға кепілдік беруді талап етеді, бұл жеке сектордың көмірқышқыл газының шығарындыларын азайту технологиясына кететін шығындарын арттыруды көздейді.

### **1.3 Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерінің даму тенденциялары**

1992 жылы Рио-де-Жанейрода БҰҰ-ның Қоршаған орта және экологиялық таза энергия көздерін пайдалануды дамыту жөніндегі конференциясы өтті, оған 178 елден 17 мың адам қатысып, 100-ден астам мемлекет және үкімет басшылары сөз сөйледі [8, 12]. Бұл форумда адамзат қоғамының тұрақты дамуы мен биосфераны сақтаудың міндеттері мен жолдарын қалыптастыратын ХХ ғасырдың аяғындағы ең танымал халықаралық құжаттардың бірі – "XXI ғасырға арналған күн тәртібі" қабылданды. Әрбір елге қоғамның тұрақты дамуының ұлттық стратегиясын әзірлеу ұсынылды, онда қазіргі ұрпақ болашақ ұрпақтың өмір сүру сапасын сақтай отырып, өз қажеттіліктерін қанағаттандыру мүмкіндігінен айырмастан, өз қажеттіліктерін қауіпсіздік қанағаттандыруы тиіс. Осылайша, тұрақты даму мақсаты – қоршаған табиғат ортасының сапасын сақтай және жақсарта отырып, қоғамның қауіпсіз үйлескен экономикалық және әлеуметтік дамуын қамтамасыз ету [36].

2002 жылы Йоханнесбургте Тұрақты даму жөніндегі дүниежүзілік саммит өтті, онда 2005 жылдан бастап әлемдік қоғамдастықтың тұрақты дамуға көшуі туралы шешім қабылданды. Әр елге ұлттық деңгейде тұрақты дамуға қол жеткізуге нақты және тиімді заңдарды қабылдау және орындалуын қамтамасыз ету арқылы ықпал ету ұсынылды [37].

1999 жылы Қазақстан климатты өзгерту бойынша БҰҰ-ның Бас Конвенциясына қосылды, оның басты міндеті өркениетті энергия түрі – электр энергиясын алуға мүмкіндік беретін ең озық тәсілі ретінде жаңартылатын энергия көздерін пайдалануды көздейді.

1997 жылдың 1-10 желтоқсанында Жапонияның ежелгі астанасы – Киото қаласында БҰҰ-ның Ауа райының өзгеруі туралы Бас Конвенциясының тараптары қатысқан конференцияның үшінші сессиясында Киото хаттамасы қабылданды. Бұл құжат дамыған елдерді алты парниктік газдардың шығарындыларын (көміртегі диоксиді, метан, азот оксиді, гидрофторкөміртектер, перфторкөміртектер және күкірт гексафториді) 1990 жылмен салыстырғанда орташа есеппен 5.2%-ға төмендетуге міндеттейді. Парниктік газ шығарындыларының қатаң белгіленген мөлшерлі деңгейлері орнатылатын бірінші бюджеттік кезең (немесе эмиссия бюджеттері) 2008 жылдан 2012 жылға дейін 5 жылды қамтиды. Бұл кезең ішінде қол жеткізетін елдердің көрсеткіштері 1.3.1-кестеде парник газдарының шығарындылары



бойынша базалық көрсеткіштерге қатысты пайызбен көрсетілген (көптеген елдер үшін базалық көрсеткіш – 1990 ж.).

2009 жылдың наурыз айында Қазақстан Республикасы Киото хаттамасын ратификациялады. 2009 жылдың 4 шілдесінде «Жаңартылатын энергия көздерін пайдалануға қолдау жасау туралы» заң қабылданды [1].

Егер Қазақстан туралы айтар болсақ, онда мұнда гидроэнергетика біршама дамыған. Ал қалған түрлеріне қатысты айтар болсақ, онда белгілі бір себептерге байланысты нөлдік деңгейде тұр деуге болады. Республикамыздың Президенті қол қойған ЖЭК пайдалану туралы заңының пайда болуы баламалы энергетиканың дамуын тездетеді деген үміт бар.

1.3.1 кесте – Киото хаттамасы бойынша орташа есеппен 2008-2012 жылдар кезең ішіндегі парник газдары шығарындыларына қатысты мөлшерлік шектеулер [37].

Елдер	1990 жылдан бастап пайызбен көрсетілген шығарындылар деңгейі	Елдер	1990 жылдан бастап пайызбен көрсетілген шығарындылар деңгейі
Австралия	108	Жаңа Зеландия	100
Австрия	92	Норвегия	101
Бельгия	92	Польша	94
Болгария	92	Португалия	92
Венгрия	94	Ресей	100
Германия	92	Румыния	92
Грекия	92	Словакия	92
Дания	92	Словения	92
Еуропа одағы (15 ел)	92	Ұлыбритания	92
Ирландия	92	АҚШ	93
Исландия	110	Украина	100
Испания	92	Финляндия	92
Италия	92	Франция	92
Канада	94	Хорватия	95
Латвия	92	Чехия Республикасы	92
Литва	92	Швейцария	92
Лихтенштейн	92	Швеция	92
Люксембург	92	Эстония	92
Монако	92	Жапония	94
Нидерланды	92		

Негіздемелік конвенцияға (БҰҰ КӨНК) сәйкес Қазақстанның болып жатқан Жер климатының жаһандық жылынуына жауапты атмосфераға парниктік газдар шығарындыларын азайтуға байланысты бағдарламаларды орындау міндеттемелері бар. Парниктік газдар шығарындыларын азайту жолдарының бірі – мұнай, көмір және газ түріндегі дәстүрлі энергия көздерін Қазақстан қорларына

бай гидро, жел және күн энергиясы сияқты жаңартылатын энергия көздерімен алмастыру. Географиялық орналасуына және климаттық жағдайларға байланысты Қазақстанның айтарлықтай жел әлеуеті бар, ол елдің энергетикалық теңгерімінде осы уақытқа дейін іс жүзінде пайдаланылмаған.

БҰҰ даму бағдарламасы (БҰҰДБ) Біріккен Ұлттар Ұйымының даму институты ретінде "Қазақстан - Жел энергиясы нарығын дамыту бастамасы" бірлескен жобасын жүзеге асыру арқылы Республика Үкіметіне Қазақстанның жел энергетикалық қорларын игеруде техникалық қолдау көрсетеді. Ол ҚР Үкіметтің 2003 жылғы 25 тамыздағы № 857 «Жел энергетикасын дамыту туралы» Қаулысына сәйкес жүзеге асырылды.

Жобаны жүзеге асыру кезеңінде жобаның негізгі міндеттері орындалды, оның ішінде: жел энергетикасын дамытудың ұлттық бағдарламасының жобасы дайындалды, жаңартылатын энергия көздерін қолдау жөніндегі заң жобасы дайындалды, Қазақстан өңірлері бойынша сегіз жерде жел әлеуеті жылдық мониторингі жасалды, жел әлеуеті бойынша жылдық деректер алынды, сегіз жерде жел әлеуетін бағалау дайындалды, Қазақстан өңірлерінде бірқатар жел станцияларын салу бойынша алдын ала техникалық-экономикалық негіздемелер әзірленді.

Қазақстанда 2005 жылы электр энергиясын өндіру шамамен 67,5 миллиард кВт/сағ құрады. Соңғы жылдары электр энергиясын тұтыну мен өндірудің тұрақты өсу динамикасы байқалады, бұл экономиканың көтерілуіне байланысты.

Электр станциялардың жалпы белгіленген қуаты шамамен 18,5 мың МВт құрайды. Өндіруші қуаттар құрылымында жылу электр станциялары 15,42 МВт немесе жалпы қуаттың 87% құрайды, гидростанциялардың үлесі 12% шамасында, басқалары 1% шамасында [36].

Электр энергетикасы нысандарының Қоршаған ортаны ластау мәселесі қатты алаңдатады. Қазақстандағы көмір электр станцияларының түтін газдарындағы зиянды заттардың шоғырлануы халықаралық стандарттардан бірнеше есе асып кеткен. Электр станцияларының атмосфераға зиянды заттарды шығаруы жылына 1 млн.тоннадан асады, ал қоршаған ортаны ластайтын заттардың жалпы көлемі 11 млн. тоннадан асып тұр. Жылу электр станциялары – Қазақстандағы ЖГ шығарындыларының негізгі көздерінің бірі. Бұл сектордың үлесі ел бойынша ЖГ-ның жалпы шығарындысының 43% құрайды.

Жел энергетикасын пайдалану келешегі тиісті жел энергетикасы қорларының болуы арқылы көрсетіледі [38]. Қазақстан жел қорларына ерекше бай. Қазақстан аумағының шамамен 50%-да желдің орташа жылдық жылдамдығы 4-5 м/с, ал бірқатар аудандарда желдің жылдамдығы 6 м/с және одан да көп, бұл жел энергетикасын пайдалану үшін өте қолайлы келешекке жағдай жасайды. Сарапшылардың бағалауы бойынша Қазақстан – әлемдегі жел энергетикасын дамыту үшін барынша қолайлы жағдайлары бар елдердің бірі. Желді орындар Каспий маңында, Қазақстанның орталығы мен солтүстігінде, Қазақстанның оңтүстігі мен оңтүстік-шығысында орналасқан.

Алматы қаласынан 150 км қашықтықта Іле Алатауы мен Жетісу тау жоталарының арасында орналасқан Шелек дәлізі де 50 метр биіктікте желдің орташа жылдық жылдамдығы 7,8 м/с болатын жақсы жел әлеуетіне ие.

Әдетте, Қазақстанның көптеген өңірлері Қазақстанның орталық бөлігінен электр энергиясын жеткізуге тәуелді деген ой қалыптасқан. Электр энергиясын едәуір қашықтыққа тарату, оның ішінде инфрақұрылымның тозуына байланысты электр энергиясының айтарлықтай жоғалуына алып келеді. Елдің өңірлеріндегі электр энергиясына деген артып келе жатқан сұранысты қанағаттандыру үшін электр энергиясын жеткізуді ұлғайту талап етіледі, бұл электр желісінің өндіруші қуаттары мен инфрақұрылымын жаңарту және кеңейту үшін елеулі қаражат жұмсауға алып келеді. Жергілікті энергия көздерін пайдалану электр желісінің инфрақұрылымын дамытуға жұмсалатын елеулі қаржы салымдарын, тасымалдау кезіндегі электр энергиясының жоғалуын азайту есебінен электр энергиясына деген қажеттілікті қанағаттандыруға жұмсалатын жалпы шығын мөлшерін қысқартады.

Қазақстан Республикасының жел қорлары алып [37]. Өзінің географиялық орны бойынша Қазақстан Солтүстік жарты шардың жел белдеуінде орналасқан және аумақтың едәуір бөлігінде, негізінен солтүстік-шығыс, оңтүстік-батыс бағыттарында айтарлықтай күшті ауа ағыстары байқалады. Қазақстанның шамамен 50% пайыз аумағында желдің орташа жылдық жылдамдығы 4-5 м/с метрге жетеді, бұл елдің көлемін (2,72 млн. шаршы км астам) ескере отырып, жел энергетикалық әлеуеттің бар екенін айқындай түседі. Қазақстанның бірқатар ауданында желдің орташа жылдық жылдамдығы 6 м/с және одан жоғары деңгейге жетеді, бұл осы аудандардың жел энергетикасын пайдалану болашағын белгілейді. Жел энергетикасын пайдаланудың экономикалық мүмкіншілігі тасымалдау құрамын ескере отырып, жел станциялары мен дәстүрлі энергия көздерінен өндірілетін электр энергиясының құнының, сондай-ақ көмір электр станцияларының қуаттарын алмастыру кезінде қоршаған ортаны ластау деңгейінің қысқаруынан болатын экологиялық әсердің есебінің арақатынасымен айқындалатын болады. Жүргізілген бірқатар есептеулер бойынша жел электр станцияларының белгіленген қуаты 2024 жылға қарай шамамен 2000 МВт құрауы мүмкін.

Қазақстанның машина жасау кешені дамыған, бұл болашақта қазақстандық кәсіпорындарда жел қондырғылары өндірісін құруға мүмкіндік береді. Осының арқасында жел станцияларын салу құнын және сәйкесінше, жел станцияларынан алынатын электр энергиясының құнын төмендетуге болады. Заманауи жел энергоқұрылыс технологияларын игеру индустриаландыруға және елдің әлеуметтік-экономикалық тұрғыдан дамуына өз үлесін қосады.

ЖЭС органикалық отынды тұтынбайтындықтан атмосфераға отынның жану қалдықтарын шығармайды және оның қатты қалдықтары жоқ. Көмір жылу электр станциясынан өндірілетін электр энергиясын алмастыратын ЖЭС электр энергиясының әр кВт\*сағ күкірт тотықтарының, азот тотықтарының, ұшатын күл мен парник газдардың атмосфераға тарайтын зиянды шығарындыларын,

сондай-ақ күл-қоқыс қалдықтарын қоймалауды жояды. Жыл сайын 1,5 млрд. кВт\*сағ электр энергиясын өндіретін жаңартылатын электр станциясының 500 МВт қуаты жылына 500 мыңнан астам шартты отын тоннасын үнемдеуге және атмосфераға тарайтын жылдық шығарындыларды біршама жоюға мүмкіндік береді:

- 1,5 млн. т. көміртек қос тотығы;
- 12000 т. күкірт тотығы;
- 7800 т. азот тотығы;
- 12 600 т. ұшатын күл;
- 200 000 т. көлеміндегі күл-қоқыс қалдықтарын қоймалау.

Жаңартылатын электр станцияларының кемшілігі ретінде жел қондырғыларына соқтығыстан өлетін құстардың санын атауға болады. Алайда, арнайы жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, жел қондырғыларына соқтығысудан өлген құстар саны бір МВт қуатқа 3-7 құс, ал бұл құстардың автокөліктерге, ғимараттар мен құрылыстарға және т.б. соқтығысуынан әлдеқайда төмен.

Жел энергетикасының дамуына қолдау көрсету мақсатында Үкімет 2003 жылғы 25 тамыздағы №857 жел энергетикасын дамыту туралы қаулы қабылдады. БҰҰ-ның дамыту бағдарламасы Қазақстанға жел энергетикасын дамытуға және «Қазақстан – жел энергетикасы нарығын дамыту бастамасы» жобасын іске асыруға көмектесіп келеді. ҚР Энергетика министрлігі – осы жобаның атқарушы агенттігі. Жоба шеңберінде Қазақстанның жел энергетикалық әлеуетін нақтылау қарастырылған және Қазақстанның жел атласы құрылды, электр энергиясы нарығы жағдайында жел энергетикасын және жаңартылатын энергия көздеріне арналған нормативтік-құқықтық базаны дамыту, Қазақстанда пилоттық жел электр станциясын салу бойынша Ұлттық бағдарлама әзірленді (1.3.2-кесте).

ҚР Энергетика министрлігімен бірлесіп, жел энергетикасын дамытудың Ұлттық бағдарламасы әзірленді, оның шеңберінде 2010-2024 жылдар кезеңіне арналған жел станциялары қуатын орнатудың индикативтік сандары шамалы түрде айқындалды. Алдын ала алынған деректер бойынша, жаңартылатын электр станциялары шығаратын орнатылған қуат 2024 жылға қарай 2000 МВт құрауы мүмкін.

БҰҰДБ/ҒЭҚ және Қазақстан Үкіметінің ҚР Энергетика министрлігімен бірлесіп жүзеге асыратын “Қазақстан – жел энергетикасы нарығын дамыту бастамасы” жобасы Қазақстанға жел энергетикасын дамытуға қолдау көрсетуге бағытталған. Жоба 2030 жылға дейін электр энергетикасын дамыту бағдарламасында көзделген мақсаттарға қол жеткізу үшін жел энергетикасын дамытудың ұлттық бағдарламасын әзірлеуді, Жоңғар қақпасында қуаты 5 МВт алғашқы пилоттық ЖЭС салуды және жаңартылатын энергия көздерін дамытуға арналған нормативтік-құқықтық базаны дайындауды қамтиды. Жобаны сәтті іске асыру арқылы Қазақстанда жел энергетикасын дамытуды бастауға, сондай-

ақ Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерінің басқа да түрлерін пайдалануға қолдау алуға мүмкіндік туады.

1.3.2 кесте – ҚР БҰҰДБ метеозерттеулерінің деректері бойынша ЖЭС салу үшін зерттелген алаңдардың тізбесі [1]

№	Орналасқан жері	Аймақтар	50 м биіктіктегі жел жылдамдығы	Қуаты
1.	Жоңғар қақпасы	Жетісу	9,7	50 МВт
2.	Шелек дәлізі	Алматы	7,7	100 МВт
3.	Қордай	Жамбыл	6,1	20 МВт
4.	Жүзімдік-Шаян	ОҚО	6,7	20 МВт
5.	Астана	Ақмола	6,8	20 МВт
6.	Ерейментау	Ақмола	7,3	45 МВт
7.	Қарқаралы	Қарағанды	6,1	20 МВт
8.	Арқалық	Қостанай	6,2	20 МВт
9.	Атырау	Атырау	6,4	20 МВт
10.	Форт Шевченко	Маңғыстау	6,8	100 МВт

ЖЭС-тің жел машиналары арқылы өндірілген электр энергиясының бағасы осындай жобаға инвестиция тарту үшін жеткілікті болуы тиіс және оның орташа мерзімде өтелуін қамтамасыз ете алады.

Қарқаралы қаласының маңындағы Қарамырза таулары ауданындағы алаң да ЖЭС салу үшін жарамды деп саналады. Алаң 80 м биіктікте 6,7 м/с орташа көпжылдық жылдамдығы бар жеткілікті жел әлеуетіне ие.

Сонымен бірге келесі алаңдар ЖЭС салу үшін қолайлы деп болжам жасалған:

- Форт Шевченко қаласының ауданы ЖЭС салу үшін қолайлы. Алаң пайдалану үшін бос және 80 м биіктікте 8,5 м/с шамасында орташа көпжылдық жылдамдығы бар жақсы жел әлеуетіне ие;

- Қордай асуы ауданы ЖЭК салуға жарамды. Алаң 80 м биіктікте 6,6 м/с орташа көпжылдық жылдамдығы бар жеткілікті жел әлеуетіне ие;

- Жүзімдік ауылының маңы 50 МВт дейінгі ЖЭС дамыту үшін қолайлы. Жел жылдамдығы жел турбиналары үшін қолайлы;

- Ерейментау қаласының маңы ЖЭК салу үшін жарамды. Алаңдар 80 м биіктікте 8-9 м/с орташа көпжылдық жылдамдығы бар жақсы әлеуетке ие;

- Қарабатан ауданында жақсы жел әлеуеті бар. ЖЭК-тен 41,25 МВт қуатты электр энергиясын өндіру жылына 144 млн. кВт/с құрайды.

Бұл бағдарлама жаңартылатын энергия көздерін пайдалану басты міндет ретінде танылған төмендегідей Мемлекеттік құжаттардың мақсаттары мен міндеттеріне сай келеді: Қазақстан Республикасы Президентінің 2003 жылғы 17 мамырдағы № 1096 Жарлығымен бекітілген 2003-2015 жылдарға арналған Қазақстан Республикасының Индустриалдық-инновациялық даму стратегиясы, Қазақстан Республикасы Президентінің 2006 жылғы 14 қарашадағы №216 Жарлығымен мақұлданған 2007-2024 жылдарға арналған Қазақстан

Республикасының тұрақты дамуға көшуінің тұжырымдамасы, Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2007 жылғы 14 ақпандағы № 111-1 қаулысымен бекітілген 2007-2024 жылдарға арналған Қазақстан Республикасының тұрақты дамуға көшуінің тұжырымдамасын іске асыру жөніндегі 2007-2009 жылдарға арналған іс-шаралар жоспары, Қазақстан Республикасы Президентінің 2003 жылғы 3 желтоқсандағы Жарлығымен бекітілген Қазақстанның 2004-2015 жылдарға арналған Экологиялық қауіпсіздігі тұжырымдамасы, 2004 жылғы 18 ақпандағы №190 “Қазақстан Республикасының электр энергетикасындағы нарықтық қатынастарды одан әрі дамыту тұжырымдамасы”, Қазақстан Республикасының “Электр энергетикасы туралы” және “Энергия үнемдеу туралы” Заңдары.

Қазақстан Республикасының 2020-2025 жылдарға арналған Тұрақты дамуға көшу тұжырымдамасында энергияның балама көздерінің үлесі 2025 жылға қарай елдің жалпы энергетика теңгерімінде 15% құрайды деп болжануда.

Жел энергетикасын дамыту бойынша Ұлттық бағдарлама елдің энергетикалық теңгеріміне елеулі жел энергетикалық қорларын тартуға және осылайша экономиканың энергия сыйымдылығын азайту және елдің жалпы энергетикалық теңгеріміндегі баламалы энергия көздерінің үлесін 2050 жылға қарай 50%-ға дейін ұлғайту және парниктік газдардың шығарындыларын 1990 ж. деңгейінде тұрақтандыру жөніндегі жоспарларды қолдауға бағытталған.

Өзекті мәселелердің бірі – қашықтағы тұтынушыларды электр энергиясымен қамту. Қазақстанның едәуір аумағы электр қуатымен қамтамасыз етуді орталықтандыру кезінде шамамен 360 мың км құрайтын электр қуатын тарату желілерінің болуына себепші болады. Ұзындығы үлкен электр желілеріне күтім жасау, тарату кезінде электр энергиясымен қамтамасыз ету экономикасын нашарлататындай едәуір электр энергиясының шығынына (25-50%) алып келеді. Ауылдық электр желілерінің бір бөлігі жарамсыз болып қалған және оларды қалпына келтіру экономикалық тұрғыдан тиімсіз. ҚР АШМ деректері бойынша 255 ауылдық елді мекен орталықтанған электр қуатымен қамтудан айырылған. Қазақстанда бірнеше мың фермер қожалықтары бар (шамамен 9 мың), олар да электр қуатына зәру. Бірқатар аймақта ауылдық тұтынушыларды сумен қамтамасыз ету мәселесі өзекті болып тұр, оның себебі де электр қуатының жоқтығынан болып отыр. Тек Маңғыстау облысында халқының жалпы саны 28 мың адамды құрайтын осындай 35 елді мекен бар. Электр энергиясының және ауызсу тапшылығы қашық орналасқан аумақтардағы әлеуметтік-экономикалық даму жағдайын біршама нашарлатады.

Қазақстан Республикасының 2020-2025 жылдарға арналған тұрақты дамуға көшу тұжырымдамасында қойылған мақсаттар мен міндеттерді, сондай-ақ Қазақстан Республикасында климаттың өзгеруіне әсер етудің алдын алу бағдарламалары мен іс-шараларын орындау жөніндегі халықаралық міндеттемелерін ескере отырып, ірі көмір электр станциялары базасында орталықтандырылған электр энергиясымен қамтамасыз етудің баламасы ретінде жергілікті жаңартылатын энергия көздерін пайдалану болады.

Қазақстанның барлық дерлік өңірлерінде электр энергиясын өндіру және қуатын арттыру жоспарларын ескере отырып, жаңартылатын энергия көздерінің әлеуеті бар барлық жерлерде жаңартылатын энергия көздерін пайдалану өзектілігі сақталуда. Сонымен бірге, ХХІ ғасырдың басында энергетиканың дамуына энергетикалық қорларды тұтынудың артуына байланысты қазбалы отын қорларының шектеулі және біркелкі бөлінбеуі, елдердің энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етуге талпынысы, парниктік газ шығарындылары бойынша экологиялық шектеулер сияқты факторлар әсер етеді. Бұл факторлар энергетика теңгеріміндегі жаңартылатын энергия көздерінің үлесін арттыру қажеттілігін тудырады. Халықаралық энергетикалық агенттіктер мен институттардың зерттеулері көрсеткендей, артып келе жатқан энергияға деген сұранысты қанағаттандыру және атмосферадағы парниктік газдардың құрамын тұрақтандыру үшін 2050 жылғы әлемдік энергетикалық теңгерімдегі жаңартылатын энергия көздерінің үлесі шамамен 50% немесе одан да жоғары болуы мүмкін. Дамыған елдер жаңартылатын энергия көздерін дамыту бағдарламаларын қабылдауда. Еуропалық Одақ 2030 жылға жаңартылатын энергия көздерінен электр энергиясын өндіру үлесін 20%-ға дейін (ірі гидроэлектр станцияларын есепке алмағанда) ұлғайту туралы шешім қабылдады. Қазақстанда ірі гидроэлектрстанциясында өндірілген электр энергиясының үлесі шамамен 12% құрайды.

Жаңартылатын энергия көзінің ең қарқынды дамып келе жатқан коммерциялық түрінің бірі – жел энергетикасы. Қазіргі уақытта жел электр станцияларының (ЖЭС) белгіленген қуаты 60 000 МВт астам немесе әлемдік өндіруші қуаттың 1,5% құрайды. Жел энергетикасы қуатының жылына 30% дейін тұрақты өсуін көрсетіп отыр. Жел энергетикасын дамытуға деген қызығушылық мына факторларға байланысты:

- отын бағасына тәуелсіз энергияның жаңартылатын қорлары;
- зиянды заттар мен парниктік газдары шығарылмайды;
- жел қондырғыларының дамыған әлемдік нарығы;
- орнатылған қуаттың бәсекелес құны (1000-1400 АҚШ долл. / КВт);
- отын құнына тәуелсіз электр энергиясының бәсекелес құны;
- ЖЭС қуаты талап етілген жүктемеге бейімделетін ЖЭС-тің қысқа мерзім ішінде салу;
- жекелеген аудандарды электр энергиясымен жеке қамтамасыз ету мүмкіндігі.

Жел энергетикасы тек экологиялық «таза» энергия көзі ретінде ғана қарастырылмайды. Жел энергетикасы сонымен қатар әлеуметтік-экономикалық дамуға, энергетикалық қауіпсіздікке қолдау көрсетіп, электр энергиясын отын құнының бағасынан тәуелді болуын төмендетеді.

Қазақстан Республикасы өзінің географиялық жағдайы бойынша Солтүстік жарты шардың жел белдеуінде орналасқан және Қазақстан аумағының едәуір бөлігінде көбінесе солтүстік-шығыс, оңтүстік-батыс бағыттағы жеткілікті күшті

ауа ағыстары байқалады. Қазақстанның бірқатар ауданында желдің орташа жылдық жылдамдығы 6 м/с жоғары деңгейге жетеді, бұл осы аудандарда жел энергетикасын дамыту болашағын белгілейді. Осыған байланысты Қазақстан жел энергетикасын пайдалану үшін ең қолайлы елдердің бірі ретінде қарастырылады. Сараптамалық бағалау деректеріне сәйкес, Қазақстанның жел энергетикалық әлеуеті жылына 1820 млрд. кВтс. электр энергиясы деп бағаланып отыр. Жақсы жел аудандары Қазақстанның орталық бөлігінде, Каспий жағалауында, сондай-ақ Оңтүстік, Оңтүстік-Шығыс және Оңтүстік-Батыстың бірқатар жерлерінде бар. БҰҰ-ның Жел энергетикасы жөніндегі даму бағдарламасының жобасы шеңберінде Қазақстан аумағы бойынша бірқатар жерлерде жел энергетикасы әлеуетін анықтау үшін жүргізілген зерттеулер Оңтүстік аймақта (Алматы, Жамбыл, Оңтүстік Қазақстан облыстары), Батыс аймақта (Маңғыстау және Атырау облыстары), Солтүстік аймақта (Ақмола облысы) және Орталық аймақта (Қарағанды облысы) жақсы жел климатының және ЖЭС салу үшін қолайлы жағдай бар екендігін көрсетеді. Еркін кеңістіктің болуы ЖЭС қуатын 1000 МВт дейін жеткізуге мүмкіндік береді. Қазақстан аумағы бойынша жел энергетикалық әлеуетінің таралуын зерттеу ЖЭС салу үшін келешекті алаңдарды анықтау мақсатында жалғасуы тиіс. Компьютерлік модельдерді (Маркал бағдарламасы ҚазЭЖҒЗИ, ҚОҚ және ТДМ зерттеулері үшін ұсынылды) пайдалана отырып, Қазақстанның электр энергетикалық секторын дамытуды модельдеу энергия тасымалдаушылар бағасының өсуі, өндіруші қуаттарды жаңғыртуға және жаңартуға инвестициялар тарту жағдайларында жел энергетикасы электр энергиясы нарығында 2025 жылға қарай 300 МВт-қа дейін және 2030 жылға қарай шамамен 2000 МВт мөлшерінде сұранысқа ие болатынын көрсетті. Қазақстанның оңтүстігі мен батысында жел энергетикасына сұраныс 2025 жылға қарай пайда болады, бұл электр энергиясы тапшылығының өсуіне және жергілікті электр станцияларында пайдаланылатын газ бағасының өсуіне, сондай-ақ Орталық Азия республикаларынан электр энергиясының импортталуына байланысты. Жаңартылатын энергия көздерін электр энергиясын өндіруге барынша тарту энергетикалық сектордан парниктік газдарының шығарылуын тұрақтандыруға қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Осылайша, жел энергетикасын дамытуға инвестициялар тарту үшін ЖЭК-тің басқа да түрлері сияқты ЖЭК-ті пайдалануды экономикалық тұрғыдан ынталандыру жөніндегі шаралары бар тиісті заңды қабылдау, сондай-ақ жел энергетикасын дамыту жөніндегі мемлекеттік бағдарламаны қабылдау қажет.

Қазақстан Республикасының 2020-2025 жылдарға арналған тұрақты дамуға көшу тұжырымдамасында Қазақстанның тұрақты экономикалық дамуын қамтамасыз ету энергияның экологиялық тиімді өндірісін, соның ішінде жаңартылатын энергия көздері мен қайталама шикізатты пайдалануға қолдау көрсету жолымен жүзеге асыру қарастырылған.

Заң тұжырымдамасында және заң жобасында энергия өндіруші ұйымдарға ЖЭК-ті электр энергиясын өндіру үшін пайдалану міндеттемелерін енгізу арқылы электр энергиясы нарығында ЖЭК-ке қолдау көрсету көзделген. Осы



міндеттемелерге сәйкес әрбір энергия өндіруші ұйымда өндірілетін электр энергиясының белгілі бір көлеміне берілген жаңартылатын энергия сертификаты болуы тиіс. Жаңартылатын энергия сертификаты – ЖЭК-тен электр энергиясының бірлігін өндіру және оны электр желісіне тарату фактісін растайтын құжат. Жаңартылатын энергия көздерін пайдалану кезінде электр энергиясын өндіруші ұйымға жаңартылатын энергия көздерін пайдалану арқылы өндірілген электр энергиясының көлеміне арналған жаңартылатын энергия сертификаттарын шығару және сату құқығы беріледі. Сертификат құны электроэнергияның нарықтық құны мен ЖЭК-тен өндірілген электр-энергиясының құны арасындағы айырмашылықты көрсетеді. Осылайша, ЖЭК пайдаланып энергия өндіруші ұйымдарға электр энергиясы нарығында электр энергиясын сатуға мүмкіндік беріледі, бұл ЖЭК пайдаланудың экономикалық тиімділігін қамтамасыз етеді. Сертификаттарды сату-сатып алу жаңартылатын энергия сертификаттары бағдарламасының шеңберінде жүзеге асырылады. Сертификаттар бағдарламасын әкімшілендіру жаңартылатын энергия бойынша өкілетті органға (Жаңартылатын энергия жөніндегі агенттік (ЖЭА)) тапсырылады. ЖЭА сертификаттарды сатып алады және энергия өндіруші ұйымдарға сатады. Сертификаттарды сатып алу көлемін және энергия өндіруші ұйымдардың сертификаттар бойынша міндеттемелерін ЖЭА жаңартылатын энергия сертификаттарының бағдарламасы негізінде белгілейді.

ЖЭК пайдалану бойынша жоспарлы көрсеткіштерге жету мақсатымен, “Жаңартылатын энергия көздерін пайдалануды қолдау туралы” заңына сәйкес, ЖЭК-ті дамытуға тартылатын инвестицияларға субсидиялар жасалуда.

Бағдарламаның мақсаты – 2035 жылға қарай жылына 900 млн.кВт/сағ және 2035 жылға қарай жылына 5 млрд. кВт\*сағ көлемінде электр энергиясын өндіру үшін Қазақстанның жел энергетикалық әлеуетін пайдалану. Бұл Қазақстан Республикасының 2020-2025 жылдарға арналған тұрақты дамуға көшу тұжырымдамасында және Қазақстан Республикасының 2003-2015 жылдарға арналған табиғи қорлар мен қоршаған ортаны сақтау жөніндегі индустриалдық-инновациялық даму стратегиясында қойылған міндеттер шеңберінде іске асырылады.

Жел энергетикасын дамытудың мақсатты көрсеткіштері: қуаты 300 МВт дейінгі 2035 жылға қарай жылына 900 млн.кВтс электр энергиясын өндіретін және қуаты 2000 МВт дейінгі 2024 жылға қарай жылына 5 млрд. кВтс электр энергиясын өндіретін ЖЭС іске қосу.

Бағдарлама міндеттері:

1. Жел энергетикасына арналған нормативтік-құқықтық және техникалық құжаттарды әзірлеу және ендіру.

2. 2050 жылға дейінгі келешегі бар жел энергетикалық қуатты 2035 жылға дейін іске қосу жоспарын әзірлеу және іске асыру.

3. Ауылдық жел энергетикасын дамытуға қолдау көрсету.

4. Жел энергетикасының ғылыми-техникалық және өнеркәсіптік базасын дамыту.

5. Жел энергетикасын дамыту бағдарламасын іске асыру саласындағы халықаралық ынтымақтастық.

Бағдарламаның басымдықтары – жел энергетикасы әлеуеті жоғары және электр энергиясы тапшы аудандарда ЖЭС қуаттарын іске қосу және жел энергетикасының ғылыми-техникалық және өнеркәсіптік базасын дамытуға қолдау көрсету.

Бағдарламаны іске асыру бойынша келесідей негізгі бағыттар қарастырылған:

1. Мемлекеттік саясатты қалыптастыру, жел энергетикасы саласындағы нормативтік-құқықтық базаны және техникалық стандарттарды әзірлеу және ендіру.

2. Жел энергетикасын дамыту бойынша мемлекеттік бағдарламаны жасау және іске асыру.

ЖЭС қуаттарын іске қосу жел энергетикасын дамытудың экономикалық әлеуеті бар аудандарда Қазақстан Республикасының өндіруші қуаттарын іске қосу жоспарларына сәйкес жүзеге асырылатын болады. ЖЭС енгізу бойынша жоспарларды жел энергетикасын дамытуға уәкілетті орган жасайтын болады. Жел энергетикалық қуаттарды іске қосу жоспарларын іске асыру жаңартылатын энергия сертификаттарының бағдарламасы арқылы жүзеге асырылатын болады, сондай-ақ инвесторлар конкурстан өту тәсілімен іріктеліп, олармен концессиялық шарттар жасалынып тартылатын болады.

Ауылдық жел энергетикасын дамыту орталықтан электр энергиясымен қамтамасыз етілмейтін немесе экономикалық тұрғыдан тиімсіз шалғай ауылдық елді мекендерде электр энергиясына қол жеткізу мүмкіндігін жақсартуға бағытталатын болады. Елді мекендер үшін ауылдық жерлердегі жел энергетикасына қолдау көрсету ауыл тұтынушыларын электр энергиясымен қамтамасыз ететін ұйым болған кезде жаңартылатын энергия сертификаттары бағдарламасы арқылы жүзеге асырылатын болады. Жекелеген ауыл тұтынушыларын (фермалар, шаруа қожалықтары) автономдық электр энергиясымен қамтамасыз ету үшін ауыл шаруашылығы өндірісін қолдау көрсететін аймақтық қолдау бағдарламалары арқылы жел қондырғыларын сатып алуға қаржылық көмек көрсету үшін қорлар құра отырып жүзеге асырылатын болады.

Отандық ғылыми-техникалық әлеуетті және өнеркәсіптік базаны дамытуға жәрдемдесу және қолдау көрсету үшін жел қондырғыларын жобалау және пайдалану бойынша тиісті нормативтік-техникалық құжаттама мен техникалық стандарттарды әзірлеуге бағытталған іс-шаралар орындалатын болады, ЖЭС салу үшін келешегі бар жерлерде жел әлеуетін айқындау жөніндегі жұмыстар жүргізілетін болады, Қазақстанның жел атласы әзірленеді, отандық кәсіпорындарда қуаттылығы шағын заманға сай жел қондырғыларын және ірі жел қондырғыларының компоненттерін өндіру үшін қолдау көрсетілетін болады, сондай-ақ жел қондырғыларына техникалық қызмет көрсету орталықтары құрылады. Жоғары оқу орындарында мемлекеттік тапсырыс негізінде

«Жаңартылатын энергия көздері» мамандығы бойынша мамандар даярлау ұйымдастырылып, жел энергетикасы саласында ғылыми зерттеулер жасалады.

Жаңартылатын энергия көздері әлемдегі тез дамитын энергетика секторы болып табылады. Жаңартылатын энергия көздері саласында үлкен халықаралық тәжірибе, технологиялар, білім және қаржыландыру тетіктері жинақталған, олар Қазақстанда халықаралық ынтымақтастықты ұйымдастыру жолымен жел энергетикасын дамыту үшін пайдаланылуы тиіс.

Жел энергетикасын қаржыландыру саласында ДБ, ЕҚДБ сияқты халықаралық қаржы ұйымдары, сондай-ақ жел энергетикасының ірі жобаларына инвестиция құюға және жаңартылатын энергия көздерін дамытуды қолдау үшін қорлар құруға мүдделі басқа да ұйымдар бар.

Тәжірибе алмасу, технологияларды беру және бірлескен өндірістерді құру саласында халықаралық даму институттары қазақстандық серіктестерін қолдауға мүдделі. Бірлескен кәсіпорындарды құру тәжірибе мен технологияларды қаржыландыруды және беруді қамтамасыз етуге көмектеседі, бұл жел турбиналарының құнын төмендетуге, турбиналар немесе олардың компоненттері өндірісін игеруге мүмкіндік береді.

ЖЭС салу жобаларын іске асыру саласында ЖЭС құрылысы кезіндегі жұмыстардың едәуір бөлігі ерекше болады және оны жабдық өндірушілердің лицензиялары бар компаниялар орындауы тиіс. Мұндай компаниялармен ынтымақтасу Қазақстанға ЖЭК салу тәжірибесін алып келуге және инвесторлар мен жабдық жеткізушілері үшін қажетті шарттарды сақтауға мүмкіндік береді.

Бағдарламаны іске асыру бойынша келесідей негізгі кезеңдер қарастырылған:

Бағдарламаны іске асырудың бірінші кезеңінде (2020 - 2025жж) келесі іс-шаралар қарастырылған:

- Жел энергетикасына дамытуға арналған нормативтік-құқықтық және техникалық құжаттарды әзірлеу және ендіру;
- ЖЭС қуатын іске қосу бойынша 2025-2050жж кезеңіне арналған жоспарды дайындау;
- Жоңғар қақпасында қуаты 5 МВт пилоттық ЖЭС салу;
- Жел энергетикасын дамытудың ғылыми-техникалық базасын құру және ақпараттық қолдау жөніндегі іс-шаралар (ЖЭС салу үшін келешегі бар аудандар бойынша деректер базасын қалыптастыру, Қазақстанның жел энергетикалық әлеуетін зерттеу, кадрлар даярлау);
- Жел энергетикасын дамыту саласында халықаралық байланыстар орнату.

Бағдарламаны іске асырудың екінші кезеңінде (2025 – 2030 жж.) келесі іс-шаралар қарастырылған:

- Жаңартылатын энергия сертификаттары бағдарламасы шеңберінде ЖЭС жобаларын іске асыру.

Бұл кезеңде 2025 жылға дейін жалпы қуаты 300 МВт болатын ЖЭС жобалары, оның ішінде: Жоңғар қақпасында (50-100МВт), Шелек дәлізінде (100-

200 МВт), Астана қ. ЖЭС-те (20 МВт), Форт Шевченко ЖЭС-те (50 МВт), сондай-ақ басқа да ЖЭС жобалары іске асырылады деп болжанған:

- Жел энергетикасы қуатын іске қосу бойынша 2035ж кезеңіне арналған жоспарды дайындау;

- Жел энергетикасының ғылыми-техникалық базасын одан әрі дамыту жөніндегі іс-шаралар, Қазақстанның жел энергетикалық әлеуетін зерттеу, кадрлар даярлау, отандық кәсіпорындарда шағын жел қондырғыларын және ірі жел қондырғыларының компоненттерін өндіру, жел қондырғыларына сервистік қызмет көрсету;

- Жел энергетикасын дамыту саласындағы халықаралық ынтымақтастықты арттыру.

Үшінші кезеңде (2030-2035 жж) келесі іс-шаралар қарастырылған:

- Жел энергетикасы қуатын іске қосу бойынша 2035ж кезеңіне арналған жобаларды іске асыру. 2035 жылға қарай ЖЭС-тің 1700 МВт қуаты ендіріледі деп болжануда;

- Алдағы болашақта ЖЭС қуатын іске қосу жоспарын белгілеу;

- Жел энергетикасының ғылыми-техникалық және өндірістік базасын әрі қарай дамыту іс-шаралары.

5. Бағдарламаны қаржыландыру

Бағдарламада ұсынылған ЖЭС құрылысы жобаларын іске асыруға қажетті қаражаттың жалпы көлемі шамамен 2 082 млн. АҚШ доллары.

Бағдарламаны іске асыру кезеңдері бойынша жұмсалатын қаражат көлемі:

Бірінші кезең (2020-2025 жылдар):

- Жоңғар қақпасында 5 МВт пилоттық ЖЭС салу - 7 млн. АҚШ доллары. Барлығы: 7,0 млн. АҚШ доллары.

Екінші кезең (2025-2030 жылдар):

- Қуаты 300 МВт жел энергетикалық қондырғыларды салу – 375 млн. АҚШ доллары. Барлығы: ЖЭС салуға 375 млн. АҚШ доллары.

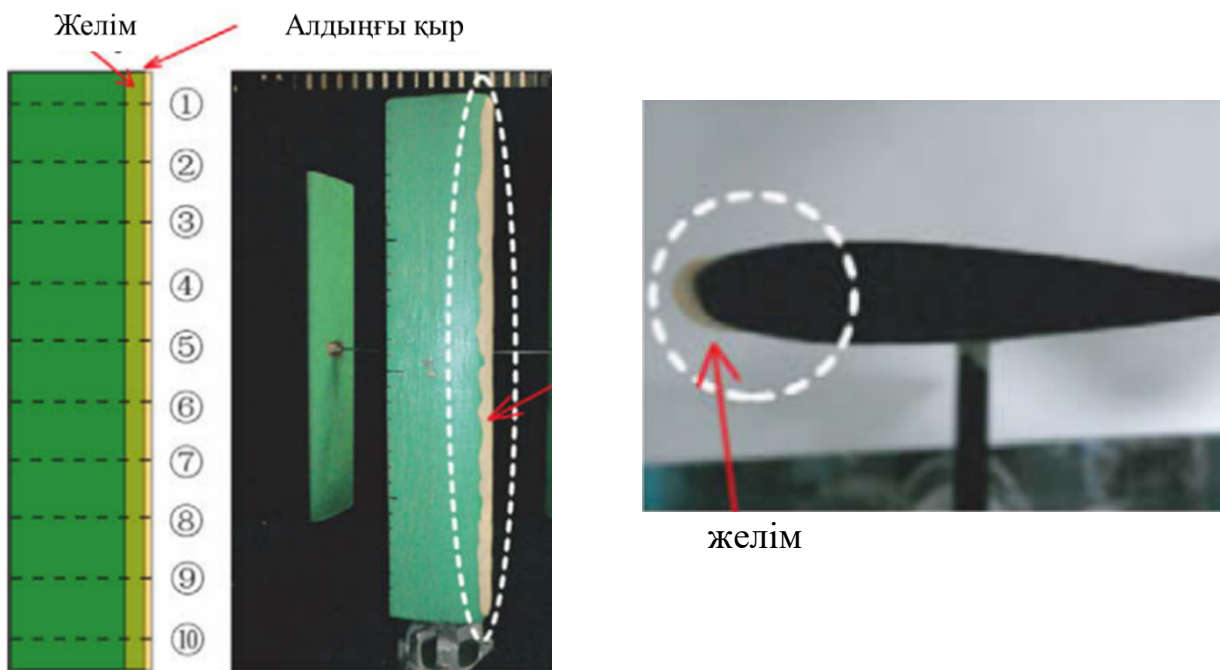
#### **1.4 Шұғыл континентальды аймақтарда орналасқан жел турбиналарының мұз қату мәселесі**

Алдыңғы бөлімдерде көрсетілгендей, әлем бойынша жел энергетикасының үлесі артуына байланысты қазіргі таңда кіші өлшемді және тік осьті Дарье жел турбиналарына деген қызығушылық артуда [39]. Мұндай қызығушылықтың байқалуы заңды құбылыс, себебі Дарье жел турбиналарының бірқатар артықшылықтары бар. Олардың қатарына: конструкциясының қарапайымдылығы, құнының төмендігі, желдің бағытына тәуелсіздігі, шағын өлшемдер және шудың төмен деңгейін жатқызуға болады [40]. Сонымен қатар, Дарье турбиналарын қалаларда, ғимараттардың төбесіне, араларына немесе жол магистральдарына орнатуға болады [41]. Десек те, зерттеулерде дәлелденген бірқатар артықшылықтарына қарамастан, Дарье турбиналарын кеңінен

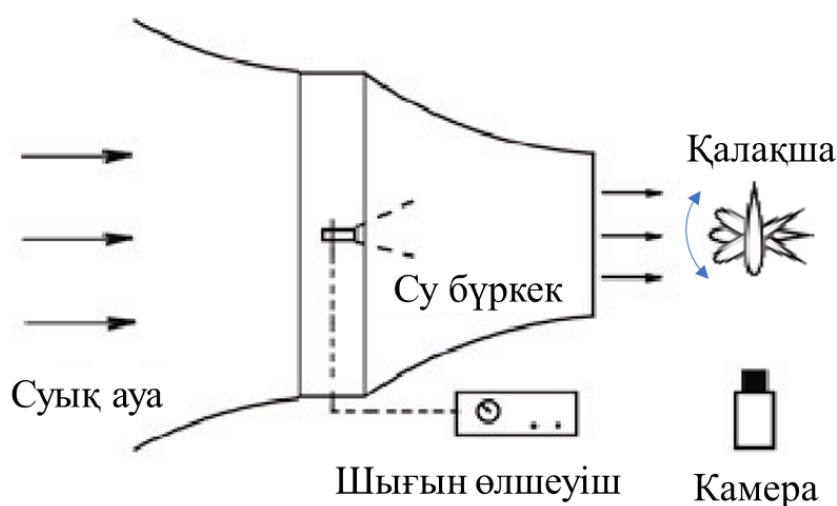
қолданысқа түсуін шектеп келе жатқан фактор бар. Ол – шұғыл континентальды аймақтардың метеорологиялық жағдайлары. Қыс мезгілінде, төмен температура мен жоғары ылғалдылық пен сулы қардың жабысуының салдарынан жел турбиналарының қалақшаларында мұз қатады [42]. Әлбетте, жел турбинының қалақшаларында мұз қатуы елеулі мәселеге айналуға мұмкін. Қалақшаларда қатқан мұз оның аэродинамикалық көрсеткіштерін әлсіретіп, жел турбинының қуат өндіру қабілетін төмендетеді. Сонымен қатар, қалақшаның мұз басуы жел турбинына деген жалпы механикалық жүктемені және турбина өндіретін шудың деңгейін арттырады [40,43–45]. Қалалық аймақтарда айналып тұрған жел турбиналарынан ажырап, ұшқан мұз кесектері адамның өмірі мен денсаулығына, жеке мүлкіне зиянын тигізуі мүмкін.

Дарье жел турбиналарында мұз қату мәселесін шешуде бірқатар зерттеу жұмыстары жүргізілген. Жел турбинының қалақшасында мұз қатудың турбина өнімділігіне әсерін зерттеу үшін Yan Li қалақшаларға түрлі пішіндерді желімдеу арқылы (1.4.1-сурет) турбинаның өнімділігін құрғақ аэродинамикалық құбырда тәжірибе жүзінде зерделенді [43]. Нәтижесінде, олар мұз қатудың жел турбинының айналу қабілетін кемітіп, энергия өнімділігіне кері әсер ететінін қортындылады. Турбина өнімділігінің төмендеуі ротордың массасының артуы мен қалақшаның аэродинамикалық параметрлерінің нашарлауымен байланысты болды. Алайда, желімделген пішіндер табиғи жағдайда қататын мұз пішіндеріне еш қатысты болған жоқ. Одан бөлек, құрғақ аэродинамикалық құбыр қыстың күніндегі қоршаған ортаның жағдайларына еш қатысы болған жоқ.

Yan Li және басқалар [44] төмен температурадағы табиғи жағдайларды ескеру үшін климаттық аэродинамикалық құбырда тік осьті жел турбины қалақшасында мұздың қатуын зерттеді. Бұл жұмыста әртүрлі атқылау бұрыштары үшін қалақшада қатқан мұздың пішіні алынды және қалақшалар жоғары сапалы камераның көмегімен суретке түсіріліп тұрды (1.4.2-сурет). Берілген жұмыс жағдайларында мұздың қатуы аэродинамикалық құбырдағы судың жеткілікті деңгейінде және қоршаған ортаның белгілі температурасына байланысты болды. Қалақшаның мұз қатқан ауданы мен мұздың қату жылдамдығы желдің жылдамдығы мен атқылау бұрышына байланысты болды. Қалақша ауданының 21,6% мұз басуы  $-80^{\circ}$  азимуттық бұрышқа сәйкес келді. Алайда, Дарье турбины қалақшасын желдің атқылау бұрышы әрдайым өзгеріп тұрады және турбинаның айналу жылдамдығына байланысты косинустар теоремасы бойынша анықталады [46–48]. Сол себепті  $-80^{\circ}$  атқылау бұрышының болуы мүмкін емес.



1.4.1-сурет. Yan Li [43] тәжірибесіндегі жел турбинының қалақшалары



1.4.2-сурет. Қалақшада мұз қатуды тәжірибелік жолмен анықтау [44]

Сандық әдістерге келетін болсақ, Yan Li және басқалары [49] желдің әртүрлі жылдамдығында, атқылау бұрыштарында және ауадағы су тамшыларының әртүрлі концентрациялары үшін қалақша бетінде түзілген мұз пішіндерін алды. Сондай-ақ, аэродинамикалық сипаттамалар, соның ішінде қалақшаның көтеру күші мен кедергі күші есептелді. Нәтижелер мұз басу қалақшаның статикалық қысым өрісін айтарлықтай өзгертетінін, кедергі күшінің артатынын және аэродинамикалық сипаттамалардың төмендететінін көрсетті. Бірақ бұл жұмыста да [49] авторлар қалақшаның атқылау бұрышын қисынсыз  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ , және  $180^\circ$  тең болады деп алды. Оған қоса, қоршаған ортаның температурасын  $-6^\circ\text{C}$  - ден

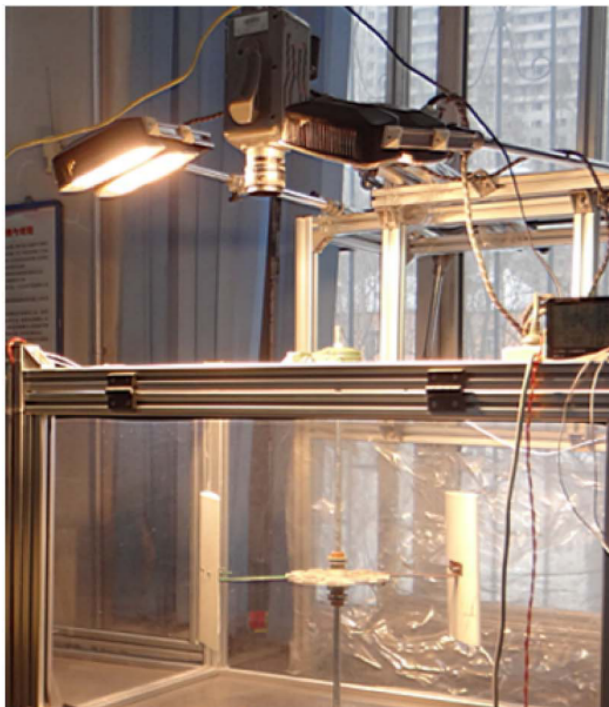
0°C - ге деп алып, су тамшыларының фазалық ауысуын түсіндіруге қажетті термодинамикалық модульді елемей, қалақшаға тиген барлық тамшыларды мұзға айналады деп тұжырымдады. Ал мұндай жайт тек өте төмен температураларда болатыны белгілі [50].

Feng және басқалары [51] мұз басқан Дарье турбиасы қалақшасының көтеру күшін сандық әдіспен жобалады. NASA0015 аэродинамикалық профиліндегі мұздың пішіндері климаттық аэродинамикалық құбырда алынды. Екі қалақшалы жел турбиасын аэродинамикалық құбырда әртүрлі азимуттық бұрышта орналастыру арқылы: 0°, 15°, 30°, 45°, 135°, 150°, 165° және 180° олардағы мұздың пішіні анықталды. Олардың сандық моделі айналып тұрған жел турбиасының қозғалысын түсіндіре алмағандықтан, жұмыстарында тек қана белгілі азимуттық бұрыштар үшін ғана статикалық жағдайлары есептелінді. Оған қоса, айналмалы қозғалыс кезіндегі жел турбиасы қалақшаларының салыстырмалы жылдамдығының өзгерісі есепке алынған жоқ.

Айналып тұрған Дарье жел турбиасында мұздың қатуын кеңінен тәжірибелік зерттеген Yan Li және басқалары [44]. Олардың жұмысында аэродинамикалық құбырда, қыс уақытында, арнайы, су бүрку жүйесінің көмегімен қос қанатты, кіші өлшемді жел турбиасының қалақшаларында мұздың түзілуі зерттелді (1.4.3-сурет). Зерттеу нәтижесінде жел турбиасының қалақшалары толықтай мұзбен қапталып, мұздың қалыңдығы уақыт өтуіне байланысты артатыны анықталды. Оған қоса, айналып тұрған қалақша мен статикалық қалақшадағы мұздың пішіні мүлдем өзгеше болатыны белгілі болды. Дегенмен, жұмыста мұз қатудың турбина өнімділігіне немесе аэродинамикалық параметрлеріне әсеріне көңіл бөлінбеген.

Дарье жел турбиасының мұз басуын және оның өнімділігінің кемуін сандық жобалау әдісін жасау қазіргі таңда өзекті мәселеге айналуға, себебі тәжірибелік әдістер тым қымбат және сандық әдістердің тәжірибелік мәліметтердің ұқсастық параметрлері жоқтың қасы [52]. Тік осьті жел турбиналарында мұз басуды тәжірибелік немесе сандық зерттеу бірқатар қиындықтарға тап болуда. Біріншіден, айналып тұрған жел турбиасының атқылау бұрышы мен салыстырмалы жылдамдығы өте жылдам өзгеріп отырады. Мәселен, дәстүрлі жел турбиналарының атқылау бұрышы уақыт өтуіне байланысты өзгеріссіз қалады. Жалпы, мұз басу ұзақ мерзімді феномен. Сол себепті, Дарье жел турбиасында мұз қатуын сандық жобалау, компьютерлік техниканың дамуына қарамастан, өте күрделі мәселе болып табылады [53]. Тіпті климаттық аэродинамикалық құбырдың өзінде соншалықты ұзақ мерзімді мұз қату барысын бақылау мүмкін емес. Екіншіден, айналып тұрған турбина айналасындағы ауа ағыны дәлме-дәл жобалануы тиіс. Атқылау бұрыштарының кең ауқымды болуынан және қалақшалардың өзара әсерлесуін ескеру жел турбиасының өнімділігін бағалауда өте маңызды роль атқарады [54]. Бірінші қалақша тудырған ауа ағынындағы өзгерістер келесі қалақшаларға да әсер етеді [55]. Мұздың пішіні де ауа ағынымен әсерлесу салдарынан өзгеріп отырады. Климаттық аэродинамикалық құбырлар қалақшаның айналуы тудыратын

күрделі ауа ағынын ескере алса да, олардың жұмыстық аймағының шектеулі болуынан үлкен көлемді жел турбиналарын сынауға жарамсыз [52]. Сәйкесінше, Дарье жел турбиналарының мұз басуын тәжірибелік зерттеу қысқа мерзімді уақыт үшін жарамды.



а)



30min

ә)

1.4.3-сурет. Айналып тұрған Дарье жел турбинасында мұз қату:  
а) тәжірибелік қондырғы; ә) 30 минут мұз қатудан кейінгі қалақшаның пішіні

Тікұшақ қалақшаларының айналымы қозғалысы Дарье жел турбиналарының қозғалысымен ұқсас келеді. Тікұшақ ілгері ұшқан кезде ауа ағынының қалақшаларға қатысты салыстырмалы жылдамдығы уақыт өтуіне байланысты өзгереді. Жел турбиналарымен ұқсас, тікұшақтың ұзақ мерзімді суық әрі ылғалды ауа ағынында ұшуы барысында мұз басуын сандық жобалау да үлкен мәселе болып келді. Бұл мәселенің шешімін Хі және Qi-Jun [56] тікұшақ қалақшаларында мұз қатудың квазистационарлы жобалау арқылы тапты. Қалақшалардағы мұздың қалыптасуы алдын ала белгіленген  $72^\circ$  азимуттық бұрыштарда есептелді. Тура солай, жалпы мұз басу уақыты бес бірдей бөлікке бөлінді. Осылайша, арнайы азимуттық бұрыштарды белгілеу мен мұз басу уақытын бірдей бөліктерге бөлу арқылы тікұшақ қалақшаларындағы мұз басуды стационарлы әдіспен шешілді.

Берілген бөлімде жаңартылатын энергия көздеріне, соның ішінде жел энергетикасының жағдайына шолу жасалды. Әлемдегі мемлекеттердің энергетикалық теңгерімінде жаңартылатын энергияны пайдалану деңгейі анықталды. Пандемиядан кейінгі 2021 жылы жел энергиясынан өндірілген



қуаттың көрсеткіші рекордтық 273 ТВт жетті, бұл әлемдік баламалы энергия көздерінің 17% құрағаны мәлім болды. 2050 жылға дейін баламалы энергия көздерінен алынатын қуат шамасы 7900 ТВт жетуі үшін жел электр станцияларын жаңа аймақтарда орнату керектігі анықталды. Олар – теңіздер немесе шұғыл континенталды аймақтар болып табылады. Шұғыл континенталды аймақтарда орналасқан жел турбиналары мұз басуға ұшырайтыны анықталды.

Келесі бөлімде тыныштықта тұрған Дарье жел турбины қалақшасында мұз басуды сандық жобалау барысы сипатталады. Атап айтқанда, мұз басуды жобалаудың сандық әдісі, сандық әдісті тәжірибелік нәтижелермен валидациялау, мұз басқан қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларының өзгерісі, мұз басудың турбина өнімділігіне әсерін бағалау.

## 2 ТЫНЫШТЫҚТА ТҰРҒАН ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ҚАЛАҚШАСЫН МҰЗ БАСУЫН САНДЫҚ ЖОБАЛАУ

### 2.1 Тік қалақшалы турбиналардың қалақшаларында мұз қату процесін Ansys FLUENT және FENSAP-ICE көмегімен жобалаудың сандық әдісі

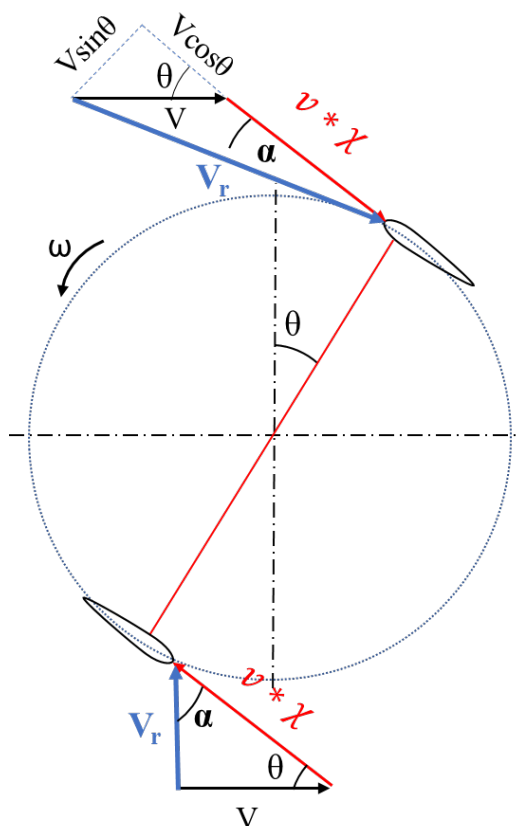
Желдің жылдамдығы Дарье жел турбинасын қалақшаларын атқылау бұрышы жел турбинасының аэродинамикалық күштерін және турбина өнімділігін есептеуде маңызды роль атқарады. Алайда, айналмалы қозғалыстың әсерінен атқылау бұрышы әрдайым уақыт өтуіне байланысты өзгеріп отырады [57, 58]. 2.1.1-суретте көрсетілгендей, турбина тұрақты бұрыштың жылдамдықпен айналған кезде оның сызықтық жылдамдығы төмендегі формуламен анықталады:

$$v_n = v \times \chi, \quad (2.1.1)$$

мұндағы  $v$  – желдің жылдамдығы,  $\chi$  – турбина жүрдектігі. Ол келесі өрнекпен анықталады:

$$\chi = \frac{w \times R}{v} \quad (2.1.2)$$

мұндағы  $w$  – турбинаның бұрыштық жылдамдығы,  $R$  – турбина радиусы.



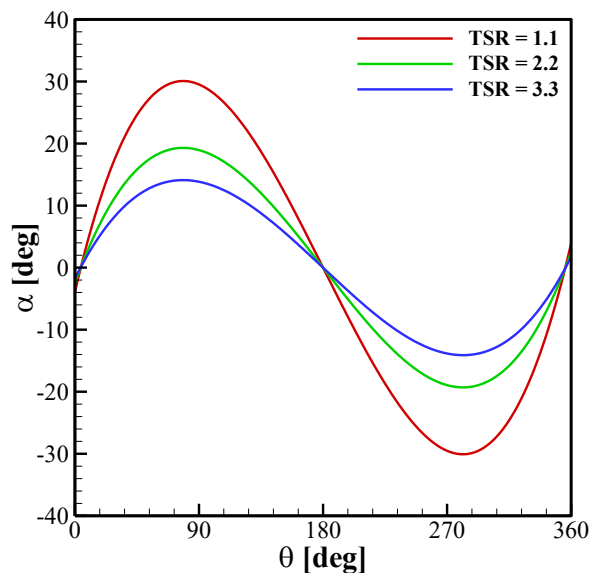
2.1.1-сурет. Айналмалы қозғалыстағы Дарье турбинасын желдің атқылау бұрышы мен салыстырмалы жылдамдығы

Қалақшаны атқылау бұрышы  $\alpha$ , оның хордасы мен желдің жылдамдығы векторы арасындағы бұрышпен анықталады. Мысал ретінде, пропеллерлі жел турбиналасы қалақшасын желдің атқылау бұрышы әрдайым тұрақты болады, алайда Дарье турбиналары үшін қалақшаны атқылау бұрышы  $\theta$  азимуттық бұрышқа байланысты өзгеріп отырады. Атқылау бұрышының мәнін және желдің салыстырмалы жылдамдығын косинустар теоремасы арқылы табуға болады [59] (2.1.3, 2.1.4 теңдеулер). 2.1.2-суретте желдің салыстырмалы жылдамдығы мен атқылау бұрышының тәуелділігі көрсетілген:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin\theta}{\cos\theta + \chi} \right) \quad (2.1.3).$$

$$v_r = v \sqrt{\sin^2\theta + (\cos\theta + \chi)^2} \quad (2.1.4).$$

(2.1.3) теңдеуге сәйкес турбина жүрдектігінің 1,1; 2,2 және 3,3 мәндері үшін есептелген атқылау бұрыштары 2.1.2-суретте көрсетілген. Осы суреттен атқылау бұрышының шекті мәні  $30^\circ$  аспайтынын көруге болады. Алайда, бұл жүрдектіктің өте төмен мәніне сәйкес келеді ( $\chi = 1,1$ ) және бұл кезде турбина қуат өндіруге жарамсыз. Жүрдектіктің ең тиімді мәндері үшін ( $\chi = 2,2$  және  $\chi = 3,3$ ) атқылау бұрышының шекті мәндері сәйкесінше  $20^\circ$ ,  $14^\circ$  аспайды, демек қалақшаларда мұз басуды жобалауда атқылау бұрыштарын аталған диапазонда алу қажет.



2.1.2-сурет. Атқылау бұрышының жүрдектік пен азимуттық бұрышқа тәуелділігі

Жел турбинасында мұз басу барысы бірнеше сағаттардан бастап, бірнеше тәуліктерге дейін созылатын ұзақ әрі күрделі үрдіс. Сәйкесінше, мұз басу барысын жобалау көптеген компьютерлік есептеу қорларын қажет етеді [60].

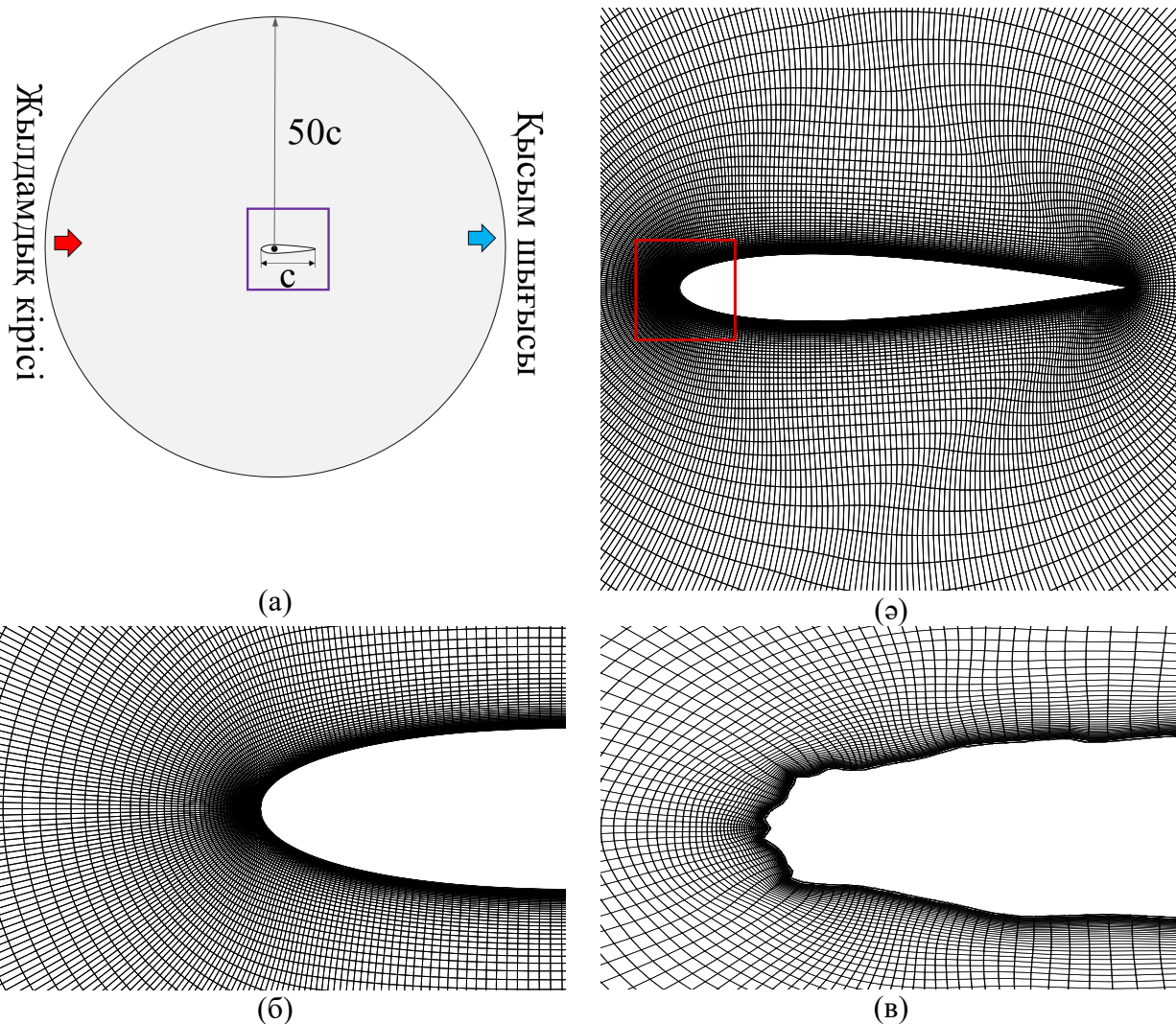
Дегенмен, Дарье жел турбинасы қалақшалары тік, әрі симметриялы. Сондықтан, оның мұз басуын жобалауды турбина центріне қатысты жазықтықта шешуге ыңғайлы және ол жеткілікті дәлдікпен нәтижелер бере алатыны белгілі [61–64]. Осыған орай диссертациялық жұмыста екі өлшемді тор қолданылды. Қалақшаның бетінде қалыптасатын мұздың массасын анықтау үшін оқшауланған, қыздырылмайтын бетте жылулық тепе-теңдікті анықтауға арналған бір өлшемді энергия тепе-теңдігінің Мессингер моделі пайдаланылды [53, 65, 66]. Бұл әдіс 2.1.3-суретте көрсетілген төрт қадамнан тұрады.



2.1.3-сурет. Статикалық қалақшада мұз қатуын жобалаудың сандық әдісі

Компьютерлік домен NASA0015 қалақшасының айналасында тұрғызылған, О-типті тіктөртбұрышты тордан тұрады. Қалақшаның беті 400 элементке бөлінген. Компьютерлік доменнің радиусы қалақша хордасының 50 еселенген шамасына тең болатындай алынды. Шекаралық қабатта есептеулердің жеткілікті деңгейдегі дәлдігін қамтамасыз ету үшін  $y^+$  шекаралық қабаттың қалыңдығының мәні  $1 \div 5$  мкм алынды [67, 68]. Тор қабырғаларының өсу коэффициенті  $k = 1,1$  болатындай алынды. 110 000 элементтер тұратын компьютерлік домен 2.1.4-суретте (а-в) келтірілген.

Есептеудің дәлдігін қамтамасыз ету үшін тордың сезімталдығы тексерілді. Сезімталдылық қалақшаны анықтайтын нүктелер саны мен алғашқы қабаттың биіктігін өзгерту арқылы жасалды. Мұз басқан қалақшаны компьютерлік жобалау қиынға соғатындықтан, мұз басқан қалақшаның көтеру (2.1.5а-сурет) және кедергі күштерінің (2.1.5ә-сурет) қалақша айналасындағы нүктелер санына сезімталдығы көрсетілген. Тордың элемент саны 100 000 аз болған жағдайда қалақшаның көтеру және кедергі коэффициенттерінің мәні екі есеге дейін өзгертіні байқалады. Бұл өз кезегінде есептеулердің нәтижелеріне орнықсыздық енгізеді. Тор элементтерінің саны 100 000 асқан кезде қалақшаның көтеру және кедергі коэффициенттері елеулі өзгеріске ұшырамайтыны байқалады. Нәтижесінде қалақшаның көтеру коэффициенті мен кедергі



2.1.4-сурет. Компьютерлік домен (а); қалақша айналасы (б); таза қалақшаның алдыңғы қыры (в); мұз қатқан қалақшаның алдыңғы қыры (г)

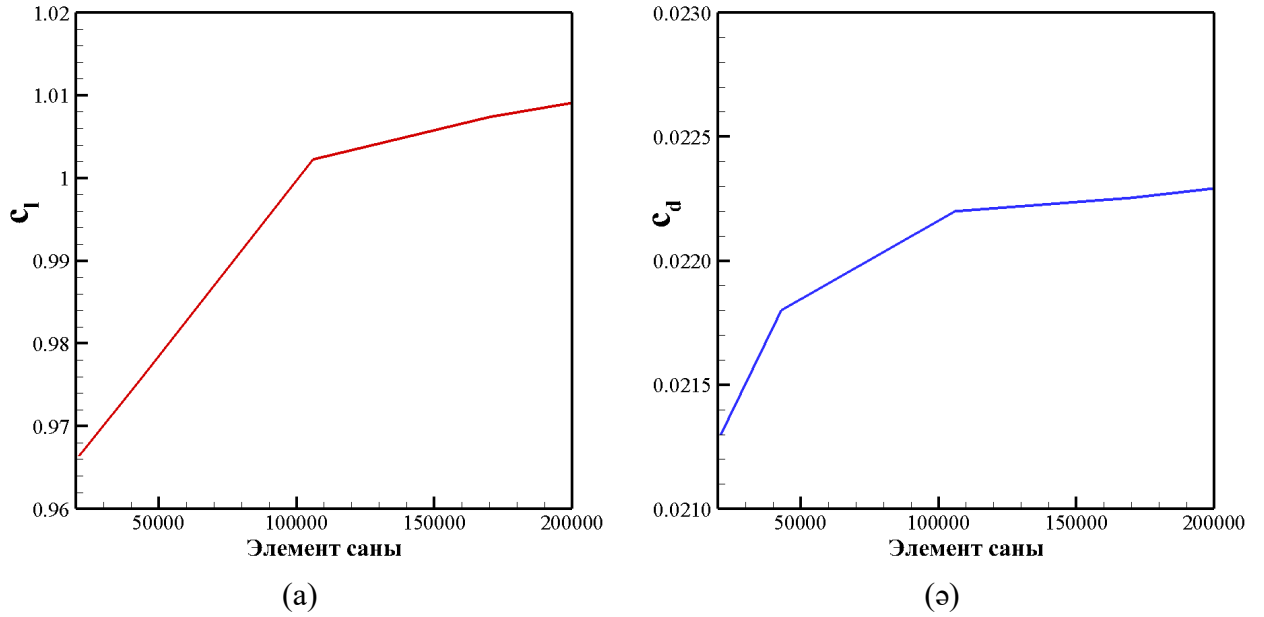
коэффициенттері тордың элементтерінің саны 100 000 асқан жағдайда айтарлықтай өзгермейтіні анықталды.

Ауа ағыны шешімі FENSAP көмегімен алынды. FENSAP масса, импульс және энергияның сақталу заңдары үшін жартылай дифференциалдың теңдеулерді (2.1.5-2.1.7) шешеді [66]:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_a \vec{v}_a) = 0 \quad (2.1.5)$$

$$\frac{\partial \rho_a \vec{v}_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_a \vec{v}_a \vec{v}_a) = \vec{\nabla} \cdot \sigma^{ij} + \rho_a \vec{g} \quad (2.1.6)$$

$$\frac{\partial \rho_a E_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_a \vec{v}_a H_a) = \vec{\nabla} \cdot (k_a (\vec{\nabla} T_a) + v_i \tau^{ij}) + \rho_a \vec{g} \cdot \vec{v}_a \quad (2.1.7).$$



2.1.5-сурет. Қалақша көтеру (а) және кедергі (ә) күштерінің тордағы элемент санына сезімталдығы

Мұз басқан қалақша бетінде пайда болатын біртекті емес мұздың биіктігін NASA ұсынған бұдырлық моделі бойынша есептеледі [69]:

$$\left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{V_\infty} = 0.4286 + 0.0044139V_\infty \quad (2.1.8)$$

$$\left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{LWC} = 0.5714 + 0.2457(LWC) + 1.2571(LWC)^2 \quad (2.1.9)$$

$$\left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{T_s} = 0.047T_s - 11.27 \quad (2.1.10)$$

мұндағы,  $LWC$  – су тамшыларының концентрациясы,  $(k_s/c)_{base}=0.001177$ . Нәтижесінде мұз басқан қалақша бетінің бұдырлығы 2.1.11 формуласымен анықталды:

$$k_s = \left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{V_\infty} \left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{LWC} \left[ \frac{(k_s/c)}{(k_s/c)_{base}} \right]_{T_s} (k_s/c)_{base} c \quad (2.1.11).$$

Дарье жел турбиналарының қалақшаларын орай өтетін ауа ағыны төмен Рейнольдс санымен сипатталатындықтан, жұмыстың берілген бөлігінде Спаларт-Аллмарас турбуленттік моделі қолданылды. Сонымен қатар, аталған модель беттік үйкеліс пен жылу алмасуды жеткілікті дәлдікпен есептеуге қабілетті [70]

$$\begin{aligned} \frac{D\tilde{v}}{Dt} = & cb_1[1 - f_{t2}]\tilde{S}\tilde{v} + \frac{1}{\sigma Re_\infty} \left\{ \nabla \cdot [(v + \tilde{v})\nabla\tilde{v}] + cb_2(\nabla\tilde{v})^2 \right\} - \\ & - \frac{1}{Re_\infty} \left[ c_{\omega 1}f_\omega - \frac{cb_1}{k^2} \left| \frac{\tilde{v}}{d} \right|^2 + Re_\infty f_{t1}(\nabla U)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.1.12)$$

мұндағы  $d$  - қабырғаға дейінгі қашықтық,  $\tilde{S}$  - турбуленттілік,  $cb_1, cb_2, c_{\omega 1}, k$  және  $\sigma$  - жабушы коэффициенттер,  $f_w$  - жабушы функция.

DROP3D модулінде [66] қалақша айналасындағы су тамшыларының ағыны жобаланды. Аталған модульде тамшылар үшін массаның (2.1.13) және импульстің (2.1.14) сақталу заңдарының теңдеуі шешіледі:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\alpha \vec{u}_{d,r}) = 0 \quad (2.1.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha \vec{u}_{d,r})}{\partial t} + \vec{v} \cdot [\alpha \vec{u}_{d,r} \vec{u}_{d,r}] + \alpha(\vec{\omega} \times \vec{u}_{d,r} + 2\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}) = \\ = \frac{C_D Re_d}{24K} \alpha(\vec{u}_{a,r} - \vec{u}_{d,r}) + \alpha \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_d} \right) \frac{\vec{g}}{Fr^2} \end{aligned} \quad (2.1.14)$$

мұндағы  $\alpha_d$  - тамшылардың көлемдік үлесі,  $\vec{u}_{d,r}$  - тамшылардың салыстырмалы жылдамдығы,  $K$  - тамшылардың инерция параметрі,  $C_D$  - тамшылардың кедергі коэффициенті,  $Fr$  - Фруд саны. Турбинаның айналымын қозғалысын ескеру үшін центрден тепкіш және Кориолис күштерін теңдіктің сол жақ бөлігіне қосылды. Архимед күші мен ауырлық күштері желдің жылдамдығына перпендикуляр болғандықтан олардың тамшыларға әсері ескерілмейді. Тамшылар ағынының шешімі келесі қадамда судың қалақша бетінде жинақталу коэффициентін есептеу үшін қолданылады:

$$\beta = \frac{\alpha_d v_d \cdot \vec{n}}{V_\infty} \quad (2.1.15)$$

мұндағы  $\vec{n}$  беттік нормаль векторы.

Аэродинамикалық модуль мен тамшылар модулінен алынған мәлімет келесі кезекте ICE3D модуліне беріледі. ICE3D модулі мұздың массасын тамшылардың жинақталу коэффициентіне негіздеп, масса (2.1.16) мен энергияның (2.1.17) сақталу заңдарының жартылай дифференциалдың теңдеулері арқылы есептейді [71,72]

$$\rho_f \left[ \frac{\partial h_f}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\vec{u}_f h_f) \right] = V_\infty LW C \beta - \dot{m}_{evap} - \dot{m}_{ice} \quad (2.1.16)$$

$$\rho_f \left[ \frac{\partial h_f C_f \tilde{T}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}_f h_f C_f \tilde{T}) \right] = \left[ C_f \tilde{T}_{d,\infty} + \frac{\|\vec{u}_d\|^2}{2} \right] V_\infty LWC\beta - \quad (2.1.17)$$

$$-0.5(L_{evap} + L_{subl})\dot{m}_{evap} + (L_{fus} - C_{ice}\tilde{T})\dot{m}_{ice} + \sigma\varepsilon(T_\infty^4 - T^4) + \dot{Q}_h$$

Су тамшылары қалақшамен соқтығысудан кейін бірден қатпай, ауаның ығыстырушы күштерінің әсерінен жұқа су қабықшасын түзіп, қалақшаны бойлай қозғалады. Су қабықшасының сызықтық жылдамдығын (2.1.18) теңдеуі арқылы табуға болады:

$$\vec{u}_f = \frac{h_f}{2\mu_w} \vec{\tau}_{a,қабырға} \quad (2.1.18)$$

мұндағы  $\vec{\tau}_{a,қабырға}$  - ауаның ығыстырушы күші тудыратын кернеу.

Төмендегі шарттар орындалған жағдайда, мұздың массасы есептеледі:

$$\begin{cases} h_f \geq 0 \\ \dot{m}_{мұз} \geq 0 \\ h_f \tilde{T} \geq 0 \\ \dot{m}_{мұз} \tilde{T} \leq 0, \end{cases} \quad (2.1.19)$$

мұндағы  $h_f$  су қабықшасының биіктігі,  $\tilde{T}$  тепе-теңдік температурасы,  $\dot{m}_{мұз}$  түзілетін мұздың массасы.

Қалақшаның қабырғасының пішіні мен торды жанарту мұз қабатының қалыңдығын (2.1.20) ескеру арқылы жүзеге асты. Жаңартылған тор кезекті атқылау бұрышы үшін қалақшаның ауа ағынын есептеу үшін кіріс мәлімет ретінде қолданылды:

$$h_{мұз} = \frac{\dot{m}_{мұз} \Delta t \Delta A}{\rho_{мұз}} \quad (2.1.20)$$

мұндағы  $\Delta t$  - мұз басу уақыты,  $\Delta A$  - сегменттің ұзындығы.

Берілген жұмыста мұз басуды жобалау турбина центріне қатысты жазықтықта шешілді, сондықтан қалақшада түзілген мұздың қалыңдығын анықтау кезінде сегменттің ауданының орнына сегменттің ұзындығы пайдаланылды.

## 2.2 Сандық әдісті тәжірибе нәтижелерімен салыстырып тексеру

Берілген бөлімде сандық әдістің тәжірибелік мәлеметтермен валидациясы келтірілген. NASA0012 қалақшасы үшін тәжірибелік зерттеу санына көп болуына байланысты аталған аэродинамикалық профиль сандық әдісті валидациялау үшін алынды. Аэродинамикалық модуль NASA-ның



турбуленттілік жобалау қорындағы [73,74] қысым коэффициентінің таралуының тәжірибелік мәліметтерімен валидацияланды. Қалақшаның геометриялық параметрлері мен қоршаған ортаның параметрлері туралы мәлімет 2.2.1-кестеде келтірілген.

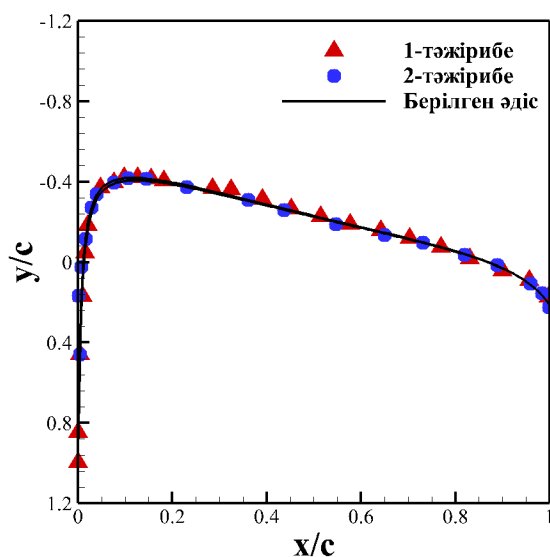
2.2.1 кесте – Сандық әдісті тәжірибемен салыстырып тексеруге қолданылған қалақшаның параметрлері

Сипаттамасы	Мәндері
Аэродинамикалық профиль	NACA0012
Хорда ұзындығы [м]	0.5334
Жел жылдамдығы, $V_{\infty}$ [м/с]	43.8
Ауа тығыздығы, $\rho_{\text{ауа}}$ [кг/м <sup>3</sup> ]	1.225
Ауа температурасы, $T_{\infty}$ [К]	288.15
Атмосфералық қысым, $p_{\infty}$ [Pa]	101 325
Атқылау бұрышы [°]	0, 10, 15

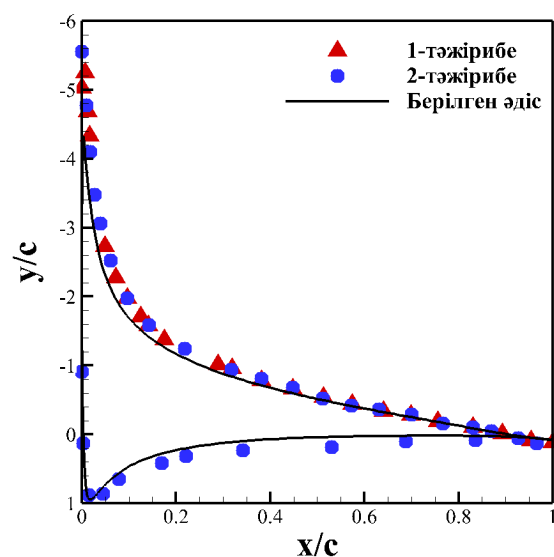
Түрлі атқылау бұрыштары үшін қысым коэффициентінің қалақша бойында таралуы 2.2.1-суретте көрсетілген. Барлық атқылау бұрыштары үшін қысымның таралуы тәжірибелік мәліметпен үйлеседі. Әсіресе, 0° (2.2.1а-сурет) және 15° (2.2.1б-сурет) атқылау бұрыштары үшін қысымның максимал және минимал мәндері тәжірибемен дәл келеді. 10° (2.2.1ә-сурет) атқылау бұрышына келетін болсақ, берілген әдіс қалақшаның төменгі бөлігіндегі минимум мәні тәжірибемен сәйкес келмейді, алайда, қысымның жалпы таралуы тәжірибелік мәліметтермен үйлесімін тапқан. Демек, FENSAP аэродинамикалық модулі статикалық қалақша айналасындағы ауа ағынын жеткілікті дәлдікпен болжай алады.

Әдетте, тамшылар тию модулін валидациялау үшін тамшыларды жинақтау коэффициентін қолданамыз. Алайда, дәстүрлі жел турбиналары үшін де мұндай тәжірибелік ақпарат жоқтың қасы. Тамшыларды жинақтау коэффициенті термодинамикалық модульде қатқан мұздың қалыңдығын анықтау үшін қолданыс табады. Демек, мұздың қалыңдығын анықтау тек тамшылардың жинақталу коэффициенті дұрыс есептелген жағдайда ғана мүмкін болады. Сондықтан тамшылардың тию модулі қатқан мұздың қалыңдығын тәжірибелік мәліметтермен салыстыру арқылы, жанама жолмен валидацияланды.

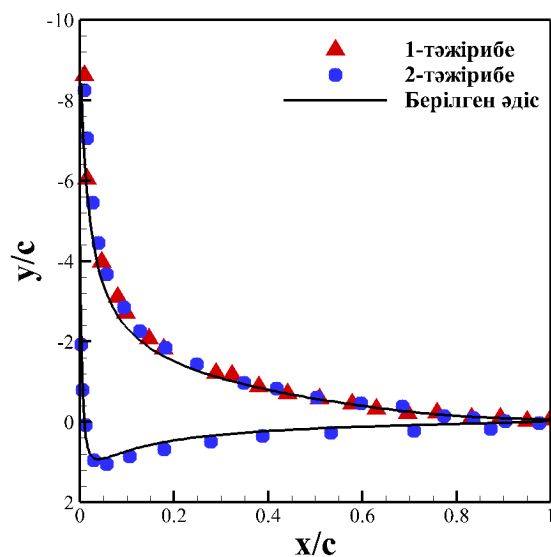
Термодинамикалық модуль NASA Lewis [75] зерттеу орталығының климаттық аэродинамикалық құбырдағы тәжірибелік мәліметтермен және LEWICE [76] симуляциялық кодымен алынған нәтижелермен салыстырылып тексерілді. Қоршаған ортаның әсерін зерттеу мақсатымен ауа температурасының кең диапазондағы мәндері таңдалды (2.2.2-кесте). Қалақшада пайда болған мұздың пішіндері 2.2.2-суретте (а-в) берілген.



(а)  $0^\circ$  атқылау бұрышы



(ә)  $10^\circ$  атқылау бұрышы

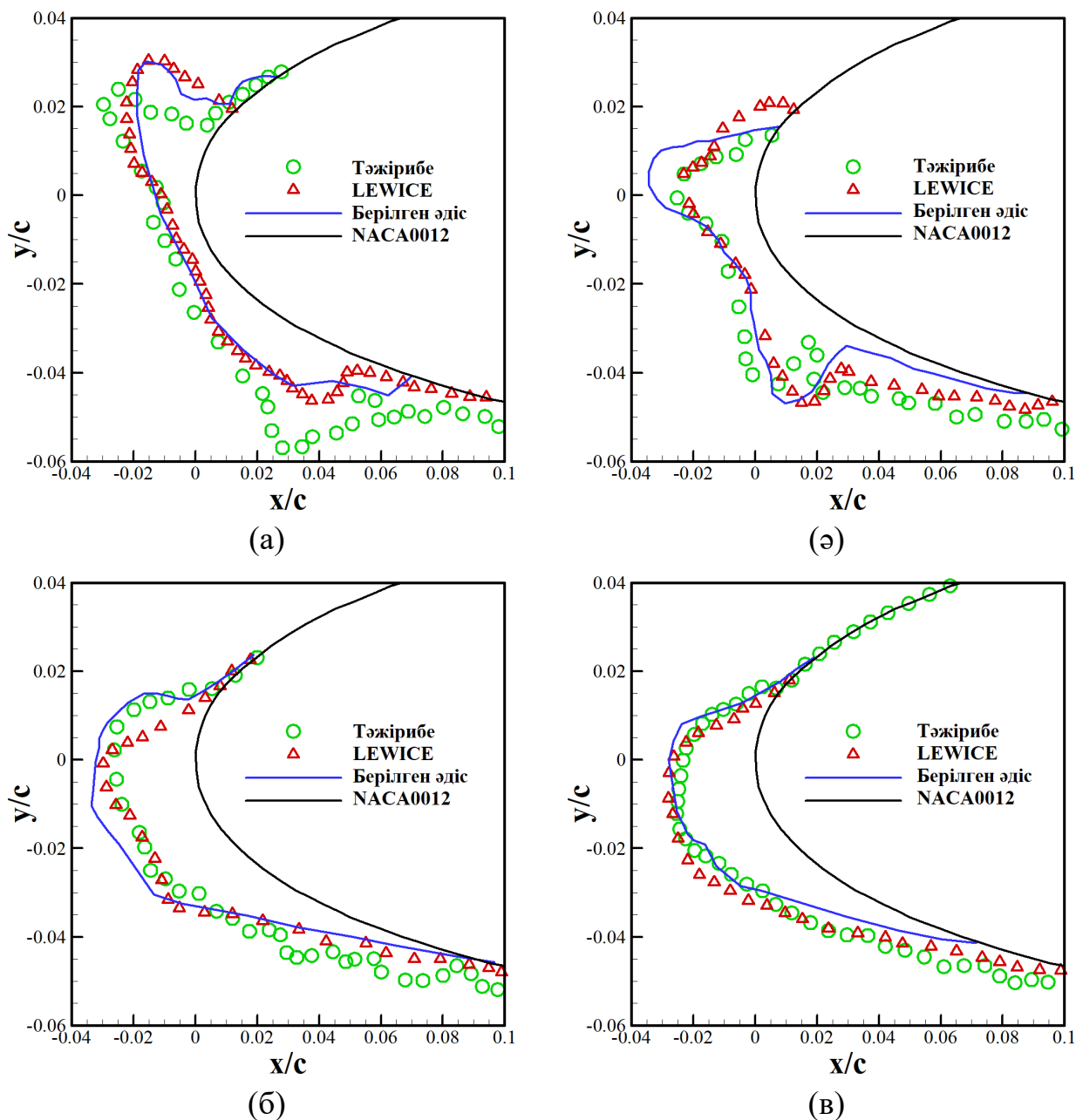


(б)  $15^\circ$  атқылау бұрышы

2.2.1-сурет. Қысымның таралу коэффициентін тәжірибемен салыстырып тексеру

2.2.2кесте – Қоршаған ортаның параметрлері

Параметр	1-жағдай	2-жағдай	3-жағдай	4-жағдай
Ауатемпературасы, $T_\infty$ [К]	262,04	262,04	256,49	250,03
Атмосфералық қысым, $P_\infty$ [кПа]	90.76	100	90.76	90.76
Жел жылдамдығы, $V_\infty$ [м/с]	102.8	102.8	102.8	102.8
Атқылау бұрышы [ $^\circ$ ]	4	4	4	4
Тамшылар диаметрі, [мкм]	20	20	20	20
Су тамшыларының концентрациясы, [г/м <sup>3</sup> ]	1	0,55	0,55	0,55



2.2.2-сурет. Қалақшада пайда болған мұздың пішіндерін валидациялау [76]

2.2.2-суреттен берілген әдістің тәжірибелік мәліметтермен және LEWICE кодының симуляция нәтижелерімен жақсы үйлесім тапқандығын көрсетеді. 2.2.2а-суретте алынған мұздың пішіні LEWICE көмегімен алынған мұздың пішінімен сәйкес келеді. Сонымен қатар, берілген әдіс, тәжірибе көрсеткендей, қалақшаның жоғары бөлігіндегі мұз мүйізін түзілуін де болжай алды. Дегенмен, тәжірибемен [76] салыстырғанда мұздың пішіні кішкене ығысқан көрінеді. Айта кететін тағы бір жайт, берілген әдіс болжаған мұздың пішіні LEWICE-пен салыстырғанда тәжірибемен [76] үйлесімді. Қалақшаның төменгі бөлігіне келетін болсақ, мұз қату шегі тәжірибеде алынған шекке жетпейді. 2.2.2ә-суретте қоршаған ортаның дәл сондай жағдайлары үшін, бірақ су тамшылары

концентрациясы үшін басқа мәнінде (0,55 г/м<sup>3</sup>) және ұзағырақ мұздату уақытында (420 с) берілген әдіс LEWICE-пен салыстырғанда дәлірек нәтиже көрсетуде. 2.2.2а-суретпен ұқсас, мұз пішіндері елеусіз шамаға ығысқан және қалақшаның төменгі бөлігіндегі мұз қату шегі тәжірибеде алынған шекке жетпейді. Ерекше төмен температуралар үшін ( $T_{\infty} = 256.49$  К) және ( $T_{\infty} = 250.03$  К) берілген әдіс тағы да LEWICE кодынан дәлірек нәтиже көрсетуде. Алдыңғы екі жағдаймен салыстырғанда мұз мүйіздері байқалмайтының себебі қалақшаға тиген су тамшылары жұқа қабықша құрмастан бірден қатып қалады. Жоғарыда келтірген мәліметті қорыта келе, берілген әдістің тыныштықта тұрған қалақшадағы мұздың пішінін дәл болжай алады деген тұжырым жасалды.

### 2.3 Мұз басудың жел турбинасы қалақшасының аэродинамикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу

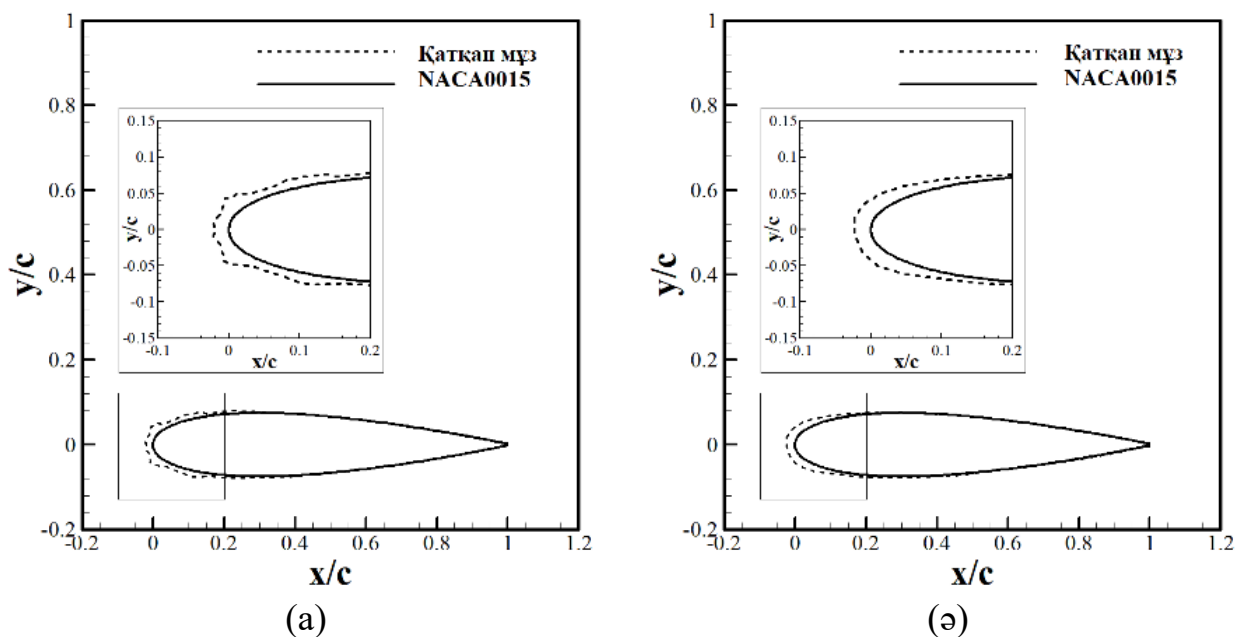
Тыныштықта тұрған жел турбинасының қалақшасында мұз алдыңғы қырында шоғырланады. Осының салдарынан қалақша қалыңдап, маңдайлық кедергі күші артады да, керісінше қалақшаның көтеру күші күрт төмендейді.

Бұл бөлімде  $-25^{\circ}$  пен  $25^{\circ}$  арасында  $10^{\circ}$  қадаммен алынған атқылау бұрыштары үшін хордасы 0,225м, NASA0015 қалақшада алынған мұз пішіндерінің оның аэродинамикалық параметрлеріне әсері зерттелді. Желдің жылдамдығы 23 м/с деп алынды, бұл өз кезегінде, ең тиімді жүрдектіктің мәніне ( $\chi = 2,29$ ) сәйкес келеді [76]. Қоршаған ортаның параметрлері 2.3.1-кестеде келтірілген.

2.3.1 кесте – Тыныштықта тұрған қалақша үшін қоршаған орта параметрлері

Сипаттама	Мәндері
Салыстырмалы қозғалыс $V_T$ [м/с]	23
Ауа тығыздығы $\rho_{\text{ауа}}$ [кг/м <sup>3</sup> ]	1.225
Ауа температурасы $T_{\infty}$ [К]	253, 265
Атмосфералық қысым, $p_{\infty}$ [Pa]	101 325
Атқылау бұрышы [ $^{\circ}$ ]	-25, -15, -5, 5, 15, 25
Орташа медианалық диаметр [мкм]	20
Су тамшылары концентрациясы [г/м <sup>3</sup> ]	0.5
Мұз қату уақыты [с]	600

Статикалық қалақшада қалыптасатын мұздың пішіндері 2.3.1-сурет (а) және (ә) кескінделген. 2.3.1а-суретте қалақшаның екі жағында да мұз мүйіздерін байқауға болады, себебі атқылау бұрышының өзгеру диапазоны өте кең және тамшылар қалақшаның екі бетіне де бірдей деңгейде тиеді, сонымен қатар, қоршаған ортаның температурасы айтарлықтай төмен болмағандықтан су тамшылары бірден қатпай, жұқа су қабатын құрап, қалақшаны бойлай қозғалады. Осы аймақтарда конвективті суыну үрдісі жоғары болады [42, 77]. Қалақшада қатқан мұз оның алдыңғы қырының пішінін өзгертеді. Алайда, хорда ұзындығының 0,2-0,5 бөлігіндегі мұздың қалыңдығы өте жұқа болып келеді, себебі су тамшылары бұл аймаққа жетіп үлгермей мұзға айналуға. Мұндай

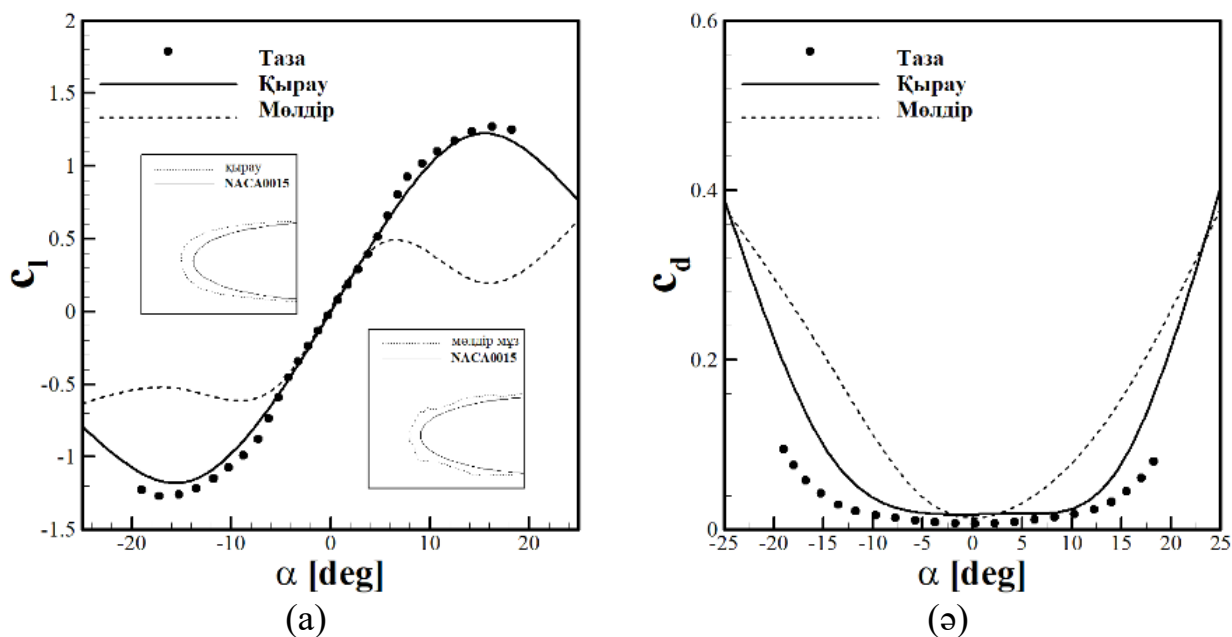


2.3.1-сурет. Статикалық қалақшада қалыптасатын мұз қабықшасының пішіндері: (а) мөлдір мұз; (ә) қырау [80]

мұзды мөлдір мұз деп атайды. Қоршаған ортаның температурасы едәуір төмен болған жағдайда (2.3.1ә-сурет) су тамшылары бірден мұзға айналып, қырауға айналады. Конвективті суыну деңгейі төмен болатындықтан мұз мүйіздері қалыптаспайды және мұздың едәуір бөлігі қалақшаның алдыңғы қырында пайда болады.

Қалақшада мұздың қалыптасуы оның алдыңғы қырының қалыңдауына әкеледі де, қалақшаның аэродинамикалық параметрлеріне кері әсерін тигізеді. Осы мәселені зерттеу мақсатымен қалақшаның көтеру, кедергі күші XFOIL бағдарламалық қамтамасыз ету құралының көмегімен алынған нәтижелермен салыстырылды. Айта кететін жайт, 2.3.1-кестеде берілген жағдайлар үшін тәжірибелік зерттеу нәтижелері болмағандықтан, қалақшаның аэродинамикалық параметрлерін XFOIL төмен Рейнольдс сандарында жеткілікті деңгейде дәлдікпен көрсете алады [78, 79].

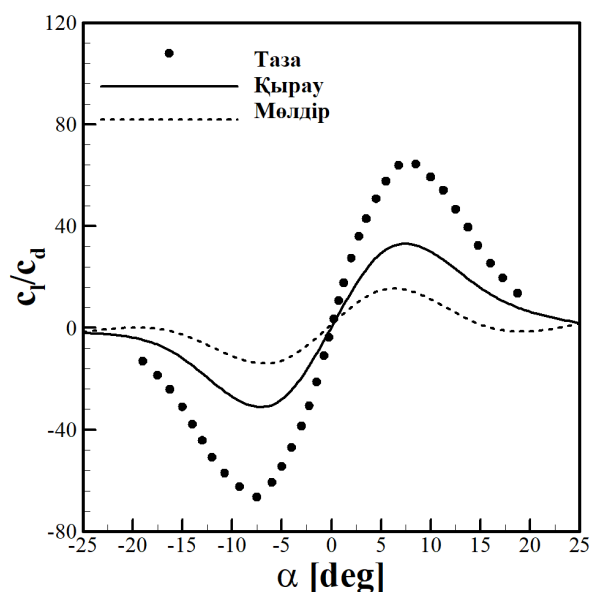
2.3.2а-суретте таза және мұз басқан қалақшалардың көтеру күшінің атқылау бұрышына тәуелділігі көрсетілген.  $0^\circ$  және  $5^\circ$  арасындағы төмен атқылау бұрыштарында барлық екі жағдай үшін де көтеру күші бірдей. Қалақшада қалыптасқан мөлдір мұз оның алдыңғы қырының пішінін өзгертіп, ауа ағынының ерте ажырауына әкеліп соғады. Нәтижесінде, мұз қатқан қалақшаның максималды көтеру күші үш есе кемиді. Мұз басқан қалақшаның көтеру күші  $14^\circ$  атқылау бұрышына дейін өзгермей, таза қалақшаның көтеру күшімен бірдей болады. Мұз басқан қалақшаның критикалық атқылау бұрышы  $14^\circ$  тең болып, көтеру күші күрт кемиді. Алайда, қырау қалақшаның пішінін айтарлықтай өзгертпейді, сондықтан көтеру күші шамамен 5% кемиді.



2.3.2-сурет. Таза және мұз басқан қалақшалардың (а) көтеру және (б) кедергі күштерінің желдің атқылау бұрышына тәуелділігі

2.3.2ә-суретте қалақшаның кедергі күшінің атқылау бұрышына тәуелділігі көрсетілген. Критикалық атқылау бұрышында кедергі күшінің едәуір артуы байқалады. Қалақшаның алдыңғы қырындағы қалыптасқан мұздың салдарынан нөлдік атқылау бұрышындағы кедергі күші таза қалақшамен салыстырғанда күрт артады. Мөлдір мұз қалыптасқан қалақшаның кедергі күші  $5^\circ$  атқылау бұрышынан бастап бірден арта бастайды. Қырау басқан қалақшаға келсек, оның көрсеткіштері  $-10^\circ$  және  $10^\circ$  арасындағы атқылау бұрыштарында елеулі өзгермейді. Критикалық атқылау бұрышына жеткен кезде, қырау басқан қалақшаның кедергі күші мөлдір мұз қалыптасқан қалақшамен бірдей шамаға жетеді.

2.3.3-суретте көтеру күшінің кедергі күшіне қатынасы берілген. Қырау басу мен мөлдір мұздың қалыптасу кезінде қалақшаның алдыңғы қырындағы өзгерістер кедергі күшінің күрт артуына әкеледі. Мөлдір мұз басу кезіндегі өзгерістер айтарлықтай елеулі болмаса да,  $c_l/c_d$  қатынасы 66,5-тен 35-ке дейін төмендеді. Қырау басқан қалақша үшін жоғарыда аталған қатынас таза қалақшамен салыстырғанда 75% дейін төмендейді.



2.3.3-сурет. Таза және мұз басқан қалақшаның көтеру және кедергі күштерінің қатынасын салыстыру

Тыныштықта тұрған қалақшада мұздың қатуы көтеру күшін төмендетіп, маңдайлық кедергі күшін арттырады. Төмен температураларда қататын мөлдір мұз қалақшаның геометриялық пішінін айтарлықтай өзгеріске ұшыратпайды. Қырау басқан кезде, мұз мүйіздері пайда болып, ауа ағынының қалақша бетінен ажырауына алып келеді.

#### 2.4 Мұз басқан қалақшаның жел турбинасының өнімділігіне әсерін бағалау

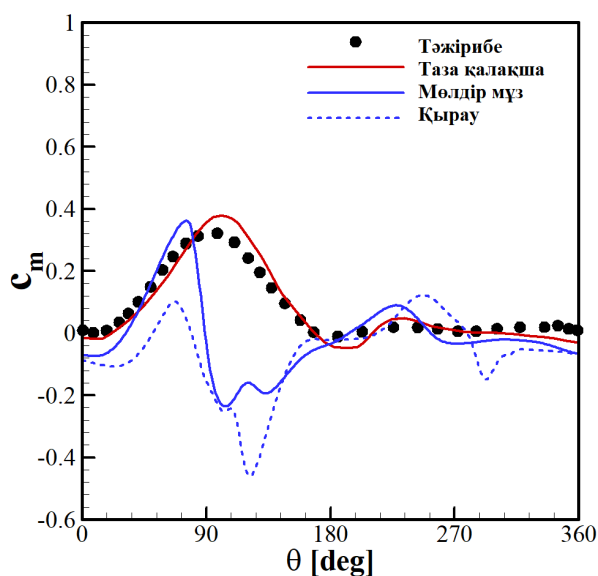
Алдыңғы бөлімде көрсетілгендей, қалақшада мұздың түзілуі оның аэродинамикалық параметрлерін нашарлатады. Сәйкесінше, жел турбинасының өнімділігіне де нұқсан келеді. Мұз басудың өндіретін қуатқа әсерін бағалау мақсатында екі қалақшалы Дарье жел турбинасының айналмалы қозғалысының стационарлық емес, компьютерлік моделі жасалды. Жел турбинасы мен қоршаған ортаның параметрлері 2.4.1-кестеде берілген.

2.4.1 кесте – Жел турбинасының параметрлері

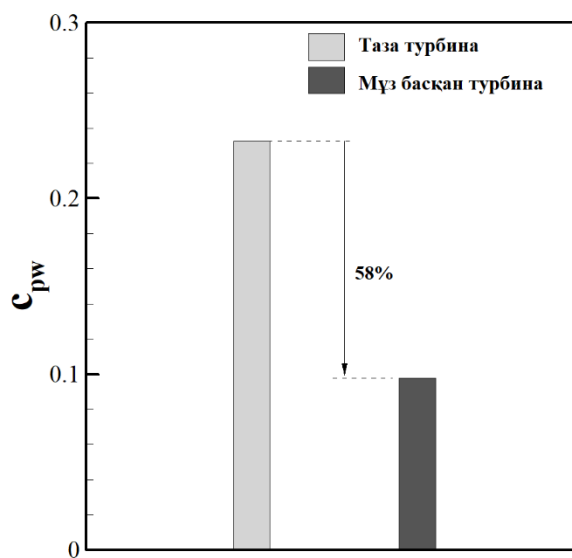
Сипаттама	Мәндері
Қалақша саны	2
Қалақша типі	Тік
Хордасы, $c$ [м]	0,225
Диаметрі, $D$ [м]	0,85
Биіктігі, $H$ [м]	1,05
Желдің жылдамдығы $v_{\infty}$ [м/с]	7
Жүрдектігі, $\chi$	2.29

Жел турбинының айналу моментін анықтау үшін ANSYS-Fluent бағдарламалық кешенінде, k-w SST турбуленттік моделі пайдаланылды. Аталған модель айналып тұрған тік осьті жел турбиналарының өнімділігін анықтауда кеңінен қолданылып келеді [57, 67, 81]. Уақыт пен кеңістік үшін 2-ші ретті іріктеу қолданылды. Уақыт қадамы турбинаның  $0,1^\circ$  азимуттық бұрышқа бұруды сәйкес етіп таңдалды. Конвергенция критерийлері айналдырушы моменттің орташа мәні бойынша нормаланған соңғы екі айналымның мәндерінің айырмасы ретінде алынды. Осы зерттеуде конвергенция  $0,1\%$  деңгейінде белгіленген. Конвергентті шешім 20 толық айналымнан кейін алынды. Турбинаның өнімділігін салыстыру үшін келесі бес айналымдағы қалақшаның орташа айналу моменті коэффициенті қолданылды.

Таза және мұз басқан турбина қалақшасының айналу моментін салыстыру 2.4.1a-суретте келтірілген. Алынған нәтижелер аэродинамикалық құбырда жасалған тәжірибе нәтижелерімен [57] де салыстырылды. 2.4.1ә-суретте көрсетілгендей таза жел турбинының айналу моменті жоғарғы ағын аймағындағы тәжірибелік деректермен сәйкес келеді. Айналу моментінің максимал мәні тәжірибелік мәннен шамалы артық екені байқалады. Таза және мұз басқан турбиналардың қуат коэффициенттері 2.4.1ә-суретте салыстырылады. Қалақшаның алдыңғы қырының қалыңдығы артады, бұл турбинаның шығыс қуатын азайтады. Турбинаның мұз басуы оның жалпы өнімділігі  $58\%$  төмендетеді, бұл жоғарғы ток аймағындағы тұрақсыз момент коэффициентіне байланысты.



(a)



(ә)

2.4.1-сурет. Таза және мұз басқан жел турбиналарының (a) айналу моменті; (ә) қуат өнімділігі

$\theta = 0^\circ$  азимуттық бұрышта мұз басқан және таза қалақшаның айналу моменті сәйкесінше,  $i_{c_m} = -0,07$  және  $c_m = -0,01$  құрайды. Тұрақты түрде артатын таза



қалақша айналу моментімен салыстырғанда, мұз басқан қалақшаны айналдырушы момент кенеттен артады. Мұз басқан қалақшаның айналу моментінің максималды мәні  $\theta = 35^\circ$  азимуттық бұрышқа ығысқан. Мөлдір мұз басқан қалақша айналу моментінің ең жоғары мәні таза қырау басқан қалақшаныкімен бірдей. Қырау басқан жағдайлар үшін айналдырушы моменттің максимал мәнің 70% - ға төмендеуі байқалады.

Сонымен қатар, мұз басқан қалақшаның айналу моменті күрт кемиді: мөлдір мұз басқан жағдайда  $\theta=100^\circ$  азимуттық бұрышта  $c_m = -0.25$  дейін, қырау басқан жағдайда  $\theta=100^\circ$  азимуттық бұрышта  $c_m = -0,50$  дейін төмендейді. Қалақша айналымның екінші жартысын өткен кезде, барлық жағдайларда қалақшаның айналдырушы моменттері бірдей мәндерге ие болады. Айналымның екінші жартысында олар өзгеріссіз қалады. Көтеру күшінің кедіргі күшіне қатынасының едәуір төмендеуі (75% - ға) қырау басқан қалақша моментінің коэффициентінің төмендеуіне әкеледі. Жел турбинының айналу моменті оң мәнге ие болатын аралықтар сирек кездеседі, яғни мұз басау жағдайында жел турбины айналуы және қуат өндіруді тоқтатады [80].

Берілген бөлімде тыныштықта тұрған Дарье жел турбины қалақшасында мұз басуды сандық жобалау барысы сипатталады. Сандық модель тәжірибелік нәтижелермен дәл үйлесім тапты. Мұз басқан қалақшаның алдыңғы қыры қалыңдап, көтеру күші күрт нашарлап, кедіргі күшінің артуы анықталды. Осының салдарынан турбинаның қуат өндіру қабілеті 58% дейін төмендейтіні мәлім болды. Дегенмен, тыныштықта тұрған қалақша турбинаның айналмалы қозғалысын толықтай сипаттауға қауқарсыз.

Келесі бөлімде айналып тұрған Дарье жел турбины қалақшасында мұз басу барысы сандық әдіспен жобаланып, тәжірибелік нәтижелермен валидацияланады.

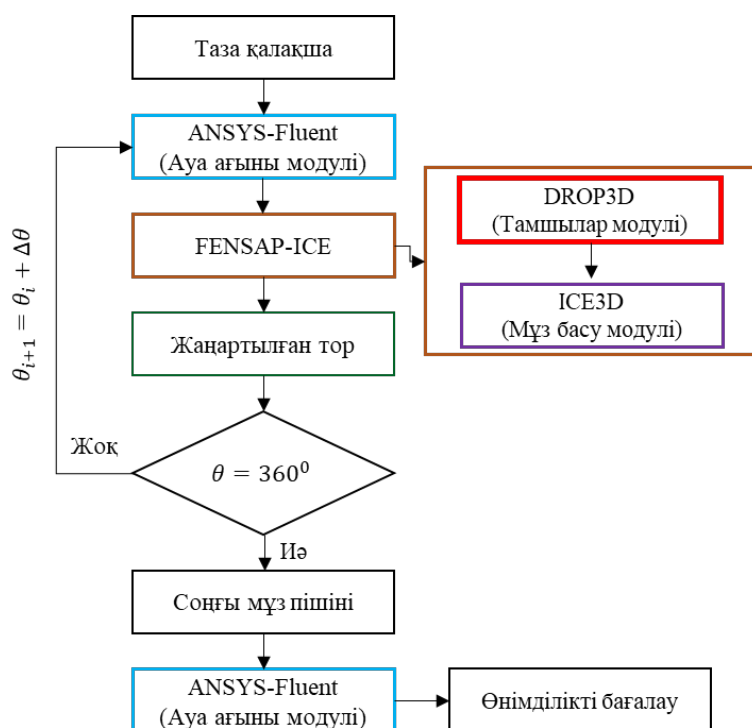
### **3 АЙНАЛЫП ТҰРҒАН ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ҚАЛАҚШАСЫНА МҰЗ ҚАТУДЫ САНДЫҚ ЖОБАЛАУ**

#### **3.1 Ansys FLUENT және FENSAP-ICE көмегімен айналып тұрған Дарье жел турбинасын мұз басуды жобалаудың сандық әдісі**

Климаттық аэродинамикалық құбырда жасалған тәжірибелерге сәйкес [44] Дарье жел турбинасының қалақшаларын толығымен мұз қабаты жабатындығы дәлелденді. Атқылау бұрыштарының кең диапазоны бар тыныштықта тұрған қалақша туралы болжам айналып тұрған қалақша бетінің толығымен мұз басуын түсіндіре алмайды [82]. Сондықтан, мұздың жиналуын дәл болжау үшін турбинаның айналмалы қозғалысының әсерін ескеру қажет. Сандық жобалауда жел турбинасының айналу қозғалысын салыстырмалы қозғалыс арқылы немесе жылжымалы тор әдістерін қолдану арқылы қарастыруға болады [83]. Кориолис пен центрден тепкіш күштерді қосу арқылы салыстырмалы қозғалыс әдісі қалақшалардың орындарын уақытша өзгертпестен жел турбинасының айналмалы қозғалысын көрсете алады. Дегенмен, уақыт бойынша орташаланған салыстырмалы қозғалыс шешімі жел турбинасының басқа қалақшаларының тудыратын құйынды өрісінің әсері сияқты тұрақсыз қалақша қозғалысынан туындаған құбылыстарды болжай алмайды. Салыстырмалы қозғалыс әдісіне қарағанда, жылжымалы тор қалақшаның толық айналуын түсіндіре алады [67]. Дегенмен, FENSAP-ICE (2019 R1 нұсқасы) тек салыстырмалы қозғалыс әдісін пайдалануға мүмкіндік береді, сондықтан мұздану мәселелерін, соның ішінде жел турбинасы үшін тұрақсыз әсерлерді дәл модельдеу үшін пайдалануға жарамсыз [66].

Ұсынылған сандық әдіс квазитұрақты жағдайда айналмалы жел турбиналарының мұз басуының уақыт өтуіне байланысты өзгерісін түсіндіре алады. 3.1.1-суретте ұсынылған әдістің логикалық сызбасы көрсетілген. Жел турбинасында мұз пішінін болжау үшін төрт негізгі модуль, атап айтқанда, ауа ағыны модулі, тамшы өрісі модулі, мұз басу модулі және торды жаңарту модулі пайдаланылады. Жел турбинасының тұрақсыз әсерлерін дәл және тиімді қарастыра алу үшін қоса біріктірілген жылжымалы тор және салыстырмалы қозғалыс әдісі қолданылады, өйткені жел турбинасының атқылау бұрыштары кең ауқымында жұмыс істейді және әр айналымда басқа қалақшалар арасындағы әрекеттесулерді ескереді.

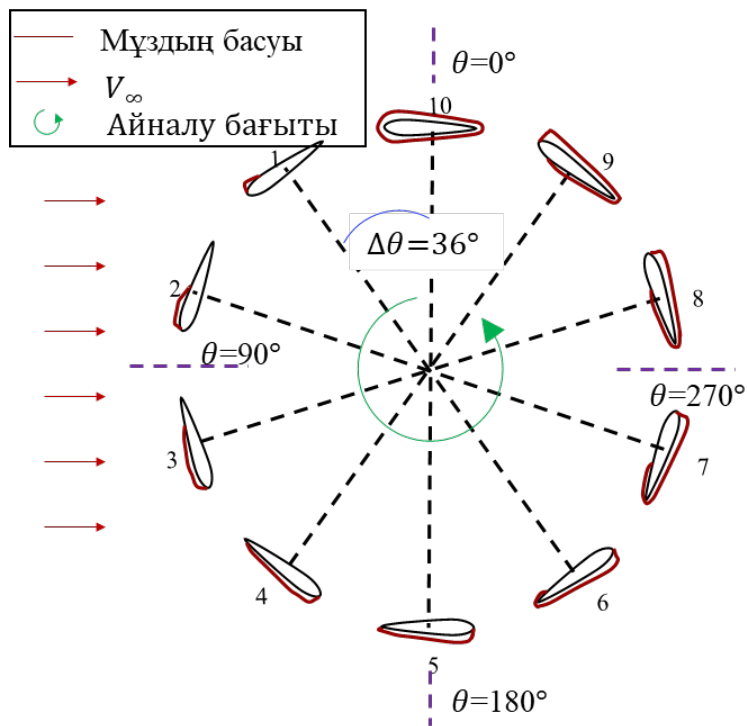
Берілген әдіс жел турбинасының айналмалы қозғалыс кезіндегі қалақшалардың орналасуын, олардың салыстырмалы жылдамдығын, атқылау бұрыштарын дәл болжау үшін қолданылады. Салыстырмалы қозғалыс әдісі тамшы, мұздану және торды жаңарту модульдерінде қолданылады. Жылжымалы тор және салыстырмалы қозғалыс әдістерін қолдана отырып алынған ағын өрісінің деректері мұздану симуляциясындағы жел турбинасының айналмалы әсерін көрсете алады. Десек те, жалғыз азимуттық бұрыш үшін алынған мұз пішіндері қалақшаның кеңістіктегі орнының уақыт бойымен өзгеруі мен айналмалы қозғалыс әсерлерін түсіндіруге қауқарсыз.



3.1.1-сурет. Сандық әдістің логикалық сызбасы

Диссертациялық жұмыста мұз пішіндері түрлі азимуттық бұрыштарда есептелді. 3.1.2-суретте көрсетілгендей, мұз пішіндері әрбір  $36^\circ$  азимуттық бұрыштары үшін анықталады, бұл мұз басу уақытының оннан бір бөлігін құрайды. Жылжымалы торға негізделген ауа ағыны модулі таза қалақшалардың мұз басуын жобалауға қолданылды. Алғашқы азимуттық бұрыш үшін алынған тұрақталған шешім тамшы өрісі, мұз басу және торды жаңарту модульдеріне беріледі. Келесі азимуттық бұрыш үшін мұз басу ескерілген, қалақшаның жаңартылған пішіндері қайтадан ауа ағыны модуліне беріледі. Одан ары, ауа ағынының шешімі тамшы өрісі, мұз басу және торды жаңарту модульдеріне беріледі. Әрбір азимуттық бұрыш үшін мұз басу уақыты жалпы мұз басу уақытының оннан бір бөлігін құрайды. Осылайша, ұсынылған әдіс мұздың аралық пішіндерін тоғыз рет жаңарту арқылы, мұз басудың соңғы пішінін болжауға мүмкіндік берді.

3.1.1-суретте көрсетілгендей, бірінші қадамда ағын өрісі ANSYS-Fluent көмегімен есептеледі, бұл ретте жел турбинасының стационарлы емес ағын өрісін дәл болжау үшін жылжымалы тор пайдаланылады. 3.1.2-суретте көрсетілгендей, жылжымалы тор көмегімен алынған екі қалақшасы бар жел турбинасы үшін  $\theta = 0^\circ$  және  $\theta = 180^\circ$  ағын өрісінің орнықты шешімі DROP3D (тамшы өрісінің модулі) және ICE3D (мұз басу модулі) тұратын FENSAP-ICE-ке жіберіледі.



3.1.2-сурет. Жел турбинының қалақшаларында мұз пішіндерін есептеу

Екінші қадамда, екі қалақшалы Дарье жел турбины үшін  $\theta = 0^\circ$  және  $180^\circ$  кезінде тамшы өрісінің айналу әсерін қарастыру үшін салыстырмалы қозғалыс әдісіне негізделген, DROP3D [66] арқылы болжанған, ағын өрісіндегі тамшылардың әрекеті нақтыланады. Стационарлы деп есептелетін орнықталған тамшы өрісі, тамшы өрісінің көлемдік үлесі мен жылдамдық векторларын көрсетеді. Демек, екі қалақшалы жел турбины үшін  $\theta = 0^\circ$  және  $\theta = 180^\circ$  кезінде тамшыларды жинақтау коэффициентін және қалақшаға тиетін судың массалық ағынының жылдамдығын есептеуге болады. Үшінші қадамда ICE3D модулі салыстырмалы қозғалыс әдісін қолданатын конвективті салқындау, меншікті балқу жылуы және басқа жылу көздеріне қатысты жылуалмасу формаларын ескере отырып, түскен судың фазасын ажыратады. Осылайша, ICE3D модулі әрбір қалақшадағы мұздың массалық қату жылдамдығын анықтайды. Соңғы қадамда мұздың пішіні қатып жатқан мұздың массасына байланысты жаңартылады. Жаңартылған мұз пішіні екі қалақшалы Дарье жел турбины үшін келесі азимут бұрыштарына  $\theta=36^\circ$  және  $\theta=216^\circ$  өзгертіледі, себебі екінші қалақшаның азимуттық бұрышы бірінші қалақшадан  $180^\circ$  артық болады. Жылжымалы тор негізіндегі ағын өрісі модулі жаңадан жаңартылған мұздану пішіні мен көлем торын пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Екі қалақшалы жел турбины үшін  $\theta = 36^\circ$  және  $216^\circ$  кезінде жылжымалы тор көмегімен алынған жинақталған ағын өрісі салыстырмалы қозғалыс негізіндегі тамшы өрісін алу үшін DROP3D-ге тасымалданады. Кейіннен ICE3D және торды жаңарту модульдері қолданылды.  $\theta=36^\circ$  қадаммен,  $\theta = 0^\circ$  мен  $\theta = 360^\circ$  дейін бетті және көлемді торларды жаңартудың тоғыз процесі бар он итерациялық есептеулердің бұл сериясы мұз басудың соңғы пішінін алуға көмектеседі. 3.1.2-

суретте жалғыз қалақша сызылғанымен, барлық қалақшалар ағын өрісі, тамшы өрісі, мұздану және жаңартылған тор модульдері арқылы симуляцияланғанда қарастырылады. Әрбір модуль келесі бөлімдерде сипатталады.

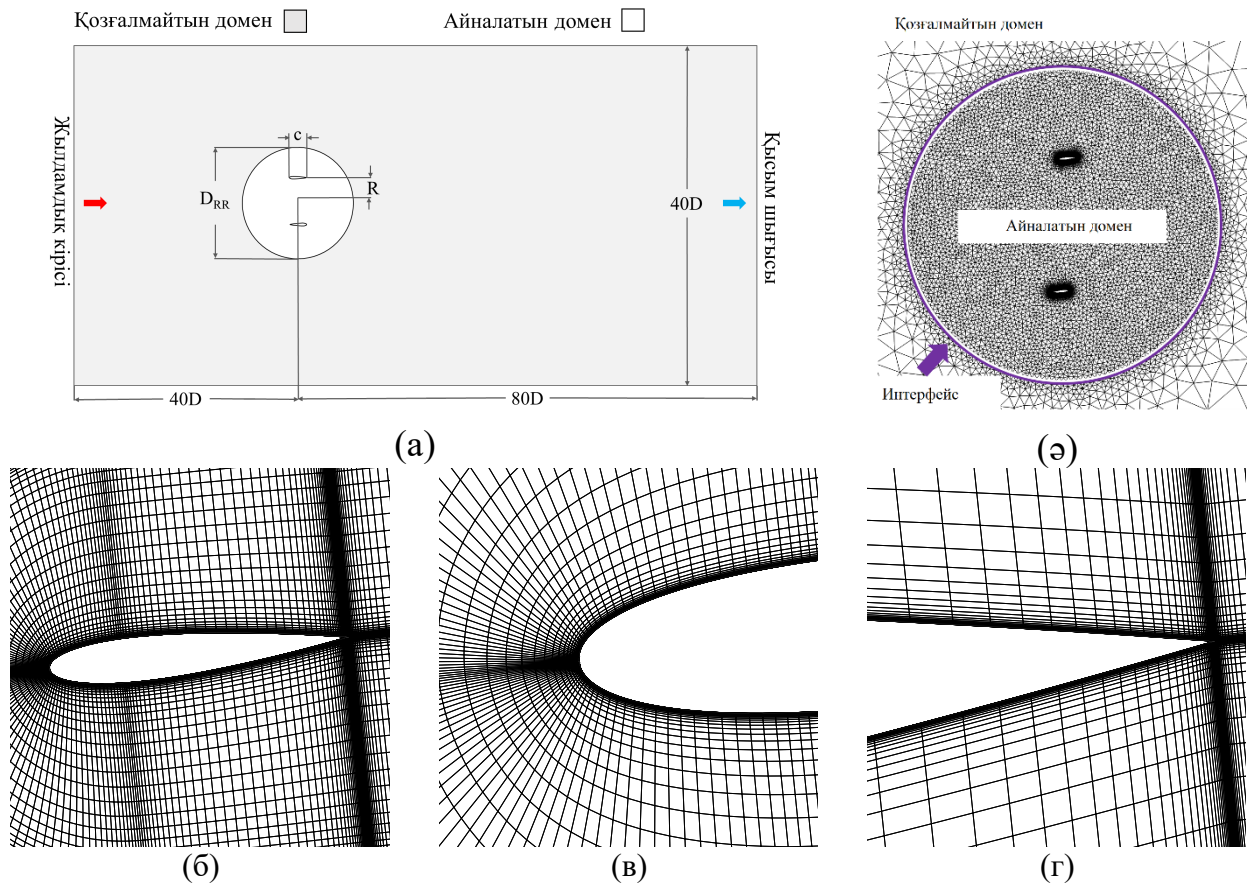
Тамшылардың турбина қалақшаларымен әрекеттесуі және жылулық баланс теңдеуі ауа ағынымен байланысты. Сондықтан, алдымен ауа ағыны есептеледі. Бұл зерттеуде мұз басу симуляциясы үшін қажетті компьютерлік есептеу қуатын үнемдеу мақсатымен екі өлшемді әдіс қолданылды. Егер қалақшаның биіктігі мен хордасының қатынасы  $H/c \gg 0$  болса, екі өлшемді тәсіл сенімді нәтижелер бере алады [61–64].

3.1.3-суретте сандық симуляция үшін қолданылатын гибриді тор жүйесі көрсетілген. Компьютерлік домен Balduzzi және т.б. [67] ұсынған жүйелік әдіске негізделі отырып жасалған. Жылдамдықтың бүйір қабырғалары, қысымның кірісі, қысымның шығысы турбинаның айналу осінен тиісінше, 20, 40, 80 және турбина диаметріндей қашықтықта орналасқан. Бүйір қабырғалары симметрия қабырғалары ретінде орнатылған. Стационарлық және айналмалы аймақтар интерфейстер арқылы байланысқан. Айналмалы аймақтың диаметрі турбинаның диаметрінен екі есе үлкен. Шекаралық қабатты дәл болжау үшін қалақшаның айналасында C-типті тіктөртбұрышты тордан тұратын, ұзындығы бір хорда ұзындығына тең шекаралар қолданылған. Қалған домен үшбұрышты құрылымсыз тордан тұрады.

Қабырғаға жақын аймақта жылдамдық профилін дәл болжау үшін бірінші қабаттың биіктігі  $5 \times 10^{-6}$  м, ал өсу коэффициенті 1,1 етіп орнатылды. Бастапқы қабаттың  $y^+$  мәні 5 немесе одан аз болады. Қалақша қабырғаларында 400 нүкте бар. Ұяшықтар жалпы саны шамамен 490 000. Бірінші қабаттың бастапқы биіктігі және қалақша бетіндегі нүктелердің саны жел турбины үшін тор сезімталдығын жүйелі зерттеуден Balduzzi және т.б.; Guo және т.б. жұмыстарынан алынған [67, 68].

ANSYS-Fluent Спаларт-Аллмарас,  $k-\omega$  және  $k-\epsilon$  [83] сияқты сығылмайтын, Рейнольдс орташа Навье-Стокс теңдеулерін шешетін турбуленттілік теңдеулерін ұсынады. Бұл зерттеуде уақыт пен кеңістікте екінші ретті дискретизациясы бар  $k-\omega$  (SST) турбуленттілік моделі қолданылды. Алдыңғы зерттеулер [84–87]  $k-\omega$  SST тұрақтылық пен сенімділік тұрғысынан жоғары дәлдікке қол жеткізетінін көрсетті және тәжірибе нәтижелерімен сәйкес келді.

Уақыт қадамы турбинаның  $0,1^\circ$  азимуттық бұрышқа бұруды сәйкес етіп таңдалды. Конвергенция критерийлері айналу моментінің орташа мәні бойынша нормаланған соңғы екі айналымның мәндерінің айырмасы ретінде алынды. Осы зерттеуде конвергенция деңгейі  $0,1\%$  деңгейінде белгіленген. Конвергентті шешім 20 толық айналымнан кейін алынды [61–64]. Конвергенцияға жеткеннен кейін ағын өрісінің деректері арнайы азимуттық бұрыштар үшін келесі бес айналым үшін орташаланатын [61–64]. Ол азимуттық бұрыштар қарастырылды. Көрсетілген азимуттық бұрыштардағы орташаланған ауа ағыны деректері DRP3D және ICE3D [71] модульдеріне кіріс ақпарат ретінде беріледі.



3.1.3-сурет. Гибридті тор жүйесі: (а) жалпы компьютерлік домен; (ә) турбина айналасы; (б) қалақша айналасы; (в) қалақшаның алдыңғы қыры; (г) қалақшаның артқы қыры

Мұз басу салдарынан өзгертін беттің кедір-бұдырлығы жылуалмасу қарқынын өзгертеді. NASA ұсынған беттің кедір-бұдырлығының функциясы судың концентрациясына ( $LWC$  [г/см<sup>3</sup>]), қоршаған ортаның температурасына ( $T$ , [K]) және ауаның жылдамдығына ( $W$ , [м/с]) тәуелді болады және олар 3.1.1-теңдеулерде берілген [51]. Ескере кететіні, мұндағы,  $W$  - ауаның салыстырмалы жылдамдығы.

$$\left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_W = 0.4286 + 0.0044139W$$

$$\left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_{LWC} = 0.5714 + 0.2457(LWC) + 1.2571(LWC)^2 \quad (3.1.1)$$

$$\left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_{T_s} = 0.047T_s - 11.27$$

Беттің кедір-бұдырының мәнін (3.1.2) теңдеудің көмегімен есептеуге болады:

$$k_s = 0.001177 \left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_W \left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_{LWC} \left[ \frac{k_s/c}{(k_s/c)_{base}} \right]_{T_s}^c \quad (3.1.2)$$

Жоғарыдағы теңдеулерден алынған беттің кедір-бұдырлығының мәні Fluent және FENSAP-ICE модульдерінде қолданылады. Аталған модульдердің сипаттамасы 2.1-тарауда көрсетілген.

Жалпы алғанда, жылжымалы тор және салыстырмалы қозғалыс мұз басуды есептеу кезінде турбинаның айналмалы қозғалысын дәл қарастыру үшін біріктіріледі. Жылжымалы тор ауа ағыны модулінде жүзеге асырылады. Жылжымалы тор орнықталған шешімі тамшы өрісіне және салыстырмалы қозғалыс негізіндегі термодинамикалық модульдерге кіріс болып табылады. Тамшы өрісінің модулінде, (2.1.14) теңдеуде көрсетілгендей, ауа өрісінің жылдамдық векторы пайдаланылады. Термодинамикалық модульде жылжымалы тор нәтижелері конвективті суыну деңгейін және қалақша бетіндегі су қабықшасының жылдамдық векторын анықтау үшін қолданылады.

Соңғы мұз басу пішінін алу үшін ағын өрісі, тамшы өрісі, мұз басу және торды жаңарту модульдері арқылы он итерация қажет, өйткені салыстырмалы қозғалыс әдісінде  $36^\circ$  азимуттық қадам ( $\Delta\theta$ ) тек бір айналым үшін ғана қарастырылады. Қалақшаның қабырғасы мен көлемдік торлар мұз қабатын ескере отырып жаңартылады. 3.1.1-суретте көрсетілгендей жаңадан жаңартылған тор келесі азимуттық бұрыш үшін ауа ағынының симуляциясына енгізіледі. Мұзбен жабылған жел қондырғысының өнімділігін бағалау үшін ағын өрісінің модулі мұз басудың соңғы пішінімен жүзеге асырылды [82].

### **3.2 Айналмалы қозғалыстағы жел турбинасының қалақшасында мұз қатуды сандық жобалау әдісін тәжірибемен салыстырып тексеру**

Ауа ағынын, тамшылар және мұз басу модульдерін валидациялаудың біріккен тәжірибелік мәліметтердің жеткіліксіздігінен, әрбір модуль тәуелсіз эксперименттерге сілтеме жасау арқылы жеке тексерілді. Климаттық аэродинамикалық құбырда жел турбинасының айналмалы қозғалысын ескере отырып тамшылардың қалақша бетінде таралуын өлшеу қиындық тудырады. Сондықтан, тамшы және мұз басу модульдері мұз басу пішіндерін әртүрлі мұз басу жағдайларындағы тәжірибелермен салыстыру арқылы жанама түрде валидацияланады. Қалақшада қатқан мұздың қалыңдығы тамшылардың жинақталу коэффициентіне тікелей тәуелді болады, сондықтан тамшыларды жинақтау коэффициентін мұздың пішіндері арқылы жанама түрде валидациялауға болады.

ANSYS-Fluent жүйесінде ауа ағыны модулін валидациялау үшін жеке қалақшаның қысым таралуы мен айналу моменті жасаған сандық жобалау мен

тәжірибелік зерттеулер нәтижелерімен валидацияланды [88]. Валидациялау үшін алынған екі қалақшалы Дарье жел турбинасының параметрлері 3.2.1-кестеде көрсетілген. Ұсынылған әдіс 3.2.1-суретте (а) - (в) суреттерде көрсетілгендей барлық азимуттық бұрыштардағы қысымның таралуын тиімді болжауға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, қысым коэффициенттерінің шекті мәндері  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  және  $270^\circ$  азимуттық бұрыштардағы тәжірибелік нәтижелермен нақты сәйкес келеді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  және  $180^\circ$  бұрыштарда есептеген нәтижелерге сәйкес келеді [88].  $270^\circ$  азимуттық бұрышта ұсынылған әдіс төмен қысым аймағындағы қалақшаның орта тұсындағы қысым коэффициентін ( $0,4 < x/c < 0,6$ ) шамалы артық болжайды. Li және т.б. [88] қолданған әдіс ANSYS-Fluent жүйесінде жылжымалы тор әдісін қолданылғанымен, олар k- $\epsilon$  турбуленттілік моделін пайдаланды, ал ұсынылған әдіс k- $\omega$  SST моделін пайдаланды. Осылайша, сәйкессіздікті турбуленттілік моделді таңдаумен байланыстыруға болады.

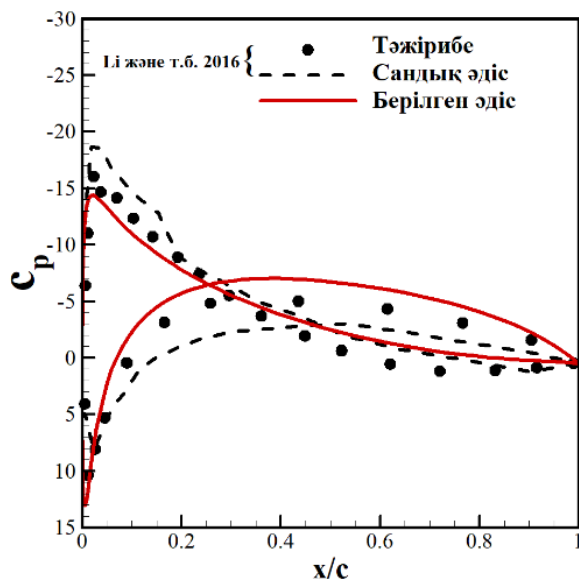
Қысымның таралу коэффициенттерінен бөлек, турбинаның айналу моменті тәжірибелік және сандық нәтижелермен салыстырылды. Бір айналым кезінде екі және үш қалақшалы жел турбинасының айналу моменті сәйкесінше 3.2.2-суретте (а) және (ә) кескінделген.

3.2.1 кесте – Әдісті валидациялауда қолданған жел турбинасының геометриялық параметрлері және жұмыс жағдайлары

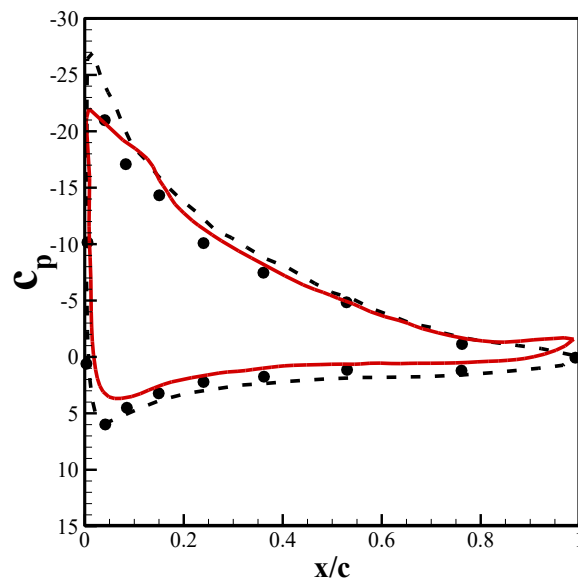
Сипаттама	Li және т.б., 2016 [88]	Balduzzi және т.б., 2016 [67]
Қалақшалар саны	2	3
Қалақша профилі	NACA0015	NACA0018
Қалақша пішіні	Түзу	Түзу
Хорда ұзындығы (м)	0.225	0.246
Турбина радиусы (м)	0.85	0.85
Қалақша биіктігі (м)	1.02	2.95
Ауа жылдамдығы (м/с)	7	8
Жүрдектігі, $\lambda$	2.29	1.1, 2.2, 3.3

Екі қалақшалы жел турбинасының айналу моменті 3.2.2а-суретте көрсетілген тәжірибелік деректермен бірдей үрдісті көрсетеді. Бірінші ширекте ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ) ұсынылған әдіс пен Li және т.б., 2016 [88] сандық әдісі тәжірибе нәтижелерімен жақсы үйлеседі. Келесі ширекте ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ) екі әдіс те  $\theta = 100^\circ$  кезіндегі момент коэффициентінің максимумдары тәжірибелік максимумнан шамамен 18% артық нәтиже көрсетуде. Төменгі ағынды аймақта ( $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ), берілген әдіс тәжірибе нәтижесімен жақсы үйлесім тапты.

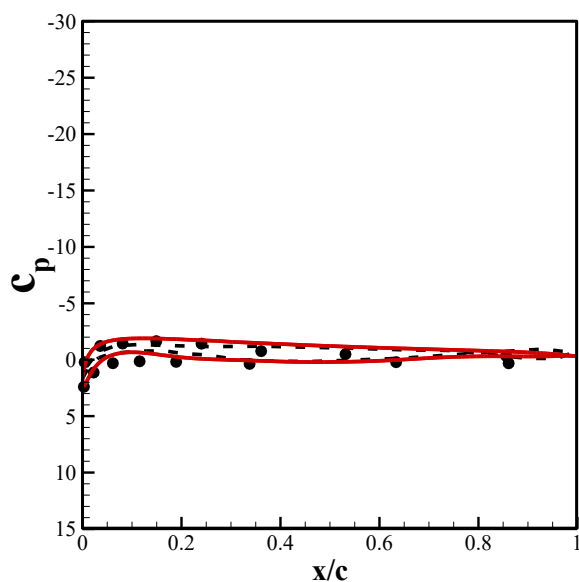




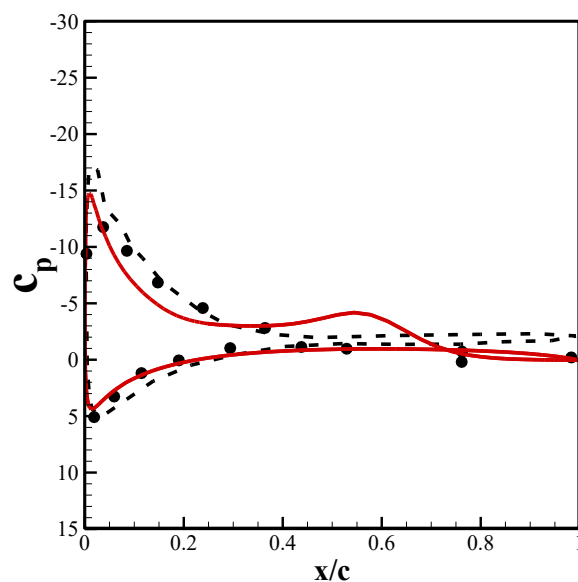
(а)  $\theta = 0^\circ$



(ә)  $\theta = 90^\circ$



(б)  $\theta = 180^\circ$



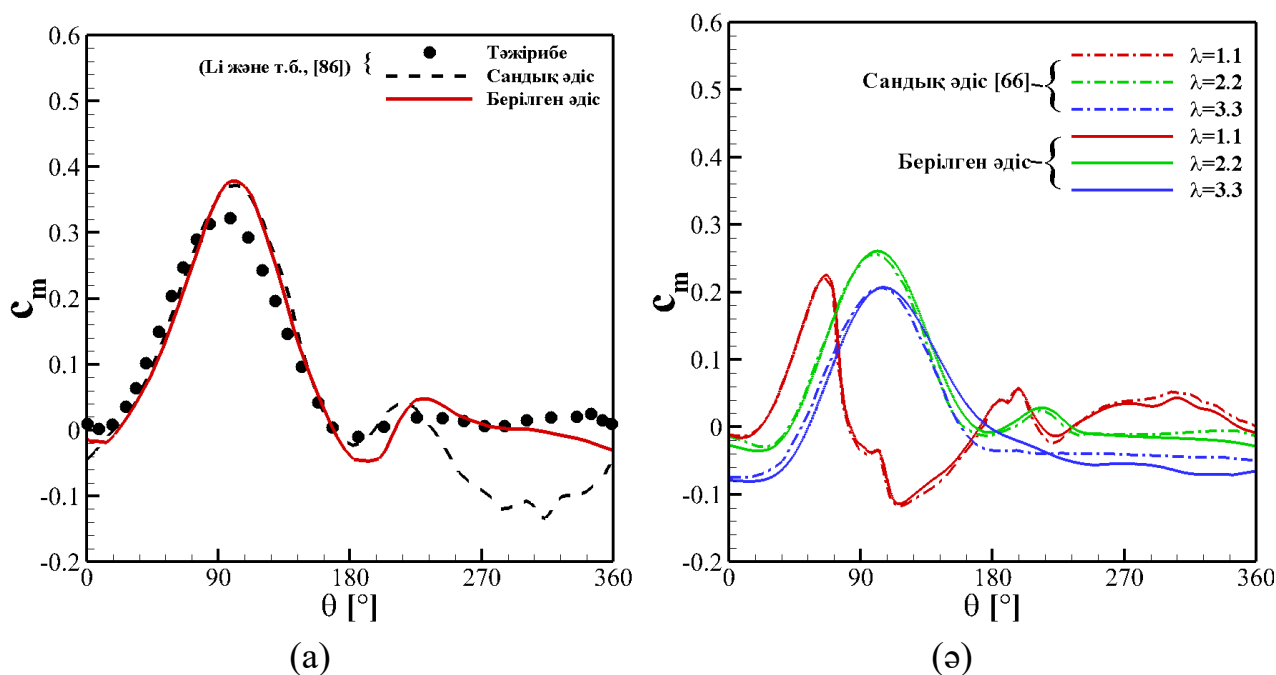
(в)  $\theta = 270^\circ$

3.2.1-сурет. Қысымның қалақшаның хорда бойымен таралуын валидациялау

3.2.2ә-суретте әртүрлі жүрдектік мәндері үшін кезіндегі үш қалақшалы жел турбинасының айналу моменті басқа сандық әдіспен (Balduzzi және т.б., 2016 [67]) салыстырылды. Ұсынылған әдіс пен Balduzzi және т.б., 2016 [67] әдістің нәтижелері ұқсас. Атап айтқанда, екі тәсіл де бірдей  $k-\omega$  SST турбуленттілік моделін қолданған. Әртүрлі жүрдектік мәндері үшін кезінде айналу моментінің ең жоғары мәндері мен фазалары ғана емес, сонымен қатар жалпы таралулары да жақсы үйлескен.

Екі қалақша жағдайында қысым мен момент таралуындағы шамалы сәйкессіздіктер байқалды. Дегенмен, ұсынылған әдістің дәлдігі жылжымалы тор көмегімен Рейнольдс орташа Навье-Стокс теңдеулерін қолданған басқа сандық

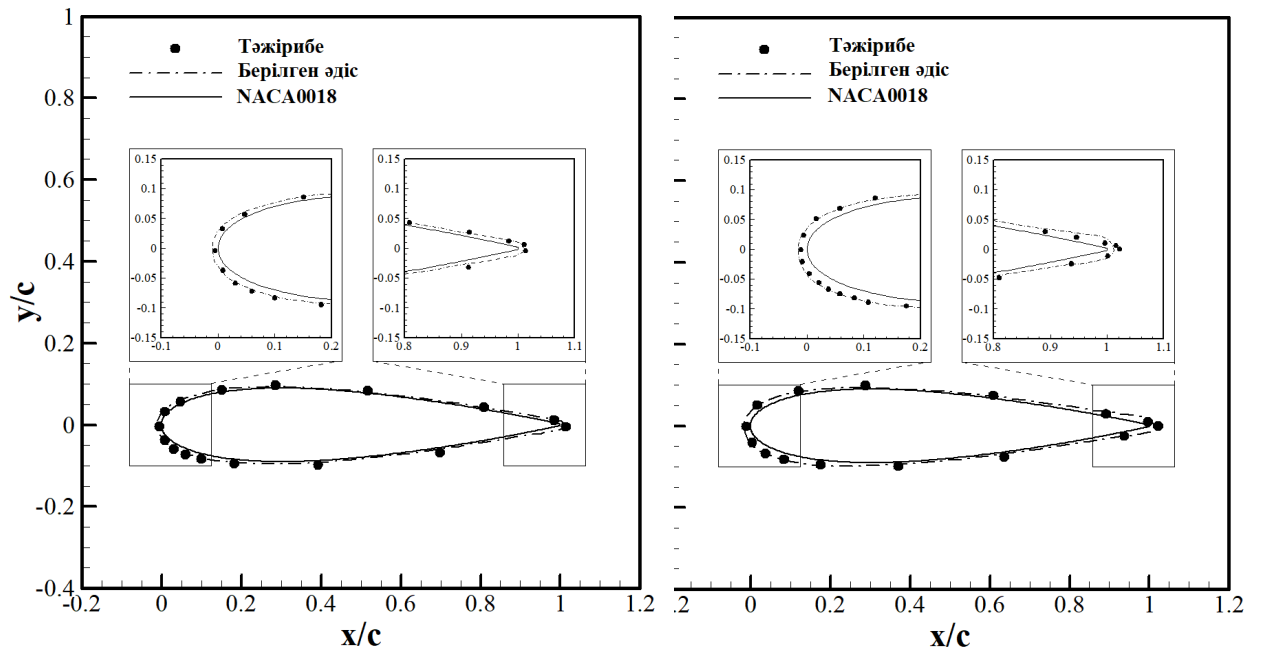
жобалау нәтижелеріне ұқсас. Алынған ауа ағынының шешімі ағынның өрісін және мұз басқан жел турбины өнімділігін дәл болжауға барабар деп қорытынды жасауға болады.



3.2.2-сурет. Жел турбины үшін айналу моментін салыстыру:  
(а) екі қалақшалы; (б) үш қалақшалы

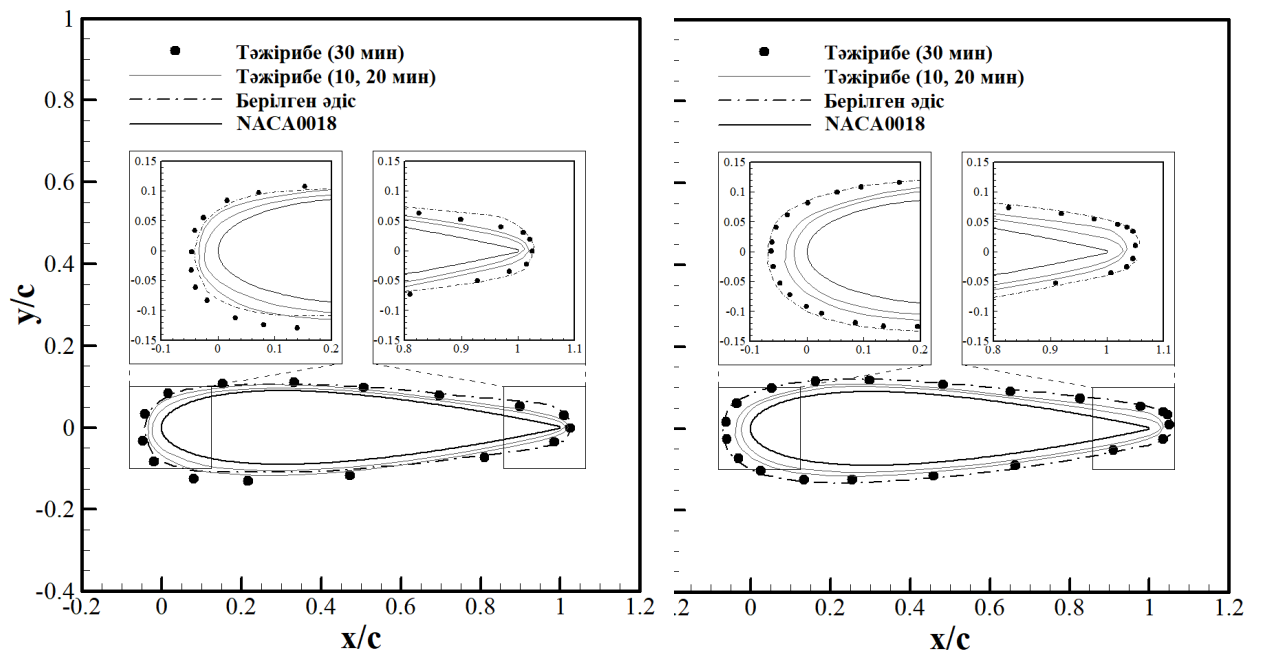
Келесі кезеңде сандық әдіс климаттық аэродинамикалық құбырда жасалған тәжірибелер [44] нәтижелерімен салыстырылып тексерілді. Тәжірибеде су тамшылары концентрациясы мен мұз басу ұзақтығының әртүрлі мәндері пайдаланылған. Салыстыруда қолданған екі қалақшалы жел турбинының геометриялық параметрлері 3.2.1-кестеде берілген. Айтап айтқанда, Li және т.б., 2018 [44] жүрдектіктің 0,2 және 1,0 мәндері үшін сынақтарды жүргізген. Алайда, жүрдектіктің 0,2 мәні үшін мұздың өте жұқа қабаты байқалды, сондықтан, бұл мұз басу пішіндерін бағалауға мысал ретінде пайдалануды қиындатады. Осылайша, жүрдектіктің  $\chi = 1,0$  мәні валидациялау үшін таңдалды.

Су тамшыларының екі концентрациялары үшін 5 минуттық мұз басудың алынған пішіндері 3.2.3а-сурет және 3.2.3б-суретте көрсетілген. Ұсынылып отырған әдістің көмегін алынған нәтижелер екі жағдайдың да тәжірибелік деректерімен сәйкес келеді. Екі жағдайда да қалақшаның толық беті жұқа мұз қабаттарымен толығымен қапталады. Мұз қабаттары алдыңғы жиектен артқы жиекке дейін біркелкі таралған. Мұз қабатының жұқа болуы әсер ету уақытының аз болуымен түсіндіріледі.



(а)

(ә)



(б)

(в)

3.2.3-сурет. Мұз басу пішіндерін тәжірибемен салыстырып тексеру

3.2.3б-суретте және 3.2.3в-суретте көрсетілгендей, су тамшыларының концентрацияларына қарамастан, суық ауаның әсер ету уақыты ұзарған кезде, атап айтқанда, 30 минутта қалақшаның геометриялық пішіндері айтарлықтай өзгереді. Алдыңғы зерттеуде сипатталған әрбір мұз өсу процесі [44] 10 минуттық аралықпен соңғы мұз пішінінің графигіне қойылады. Екі жағдайда да алдыңғы жиектегі аймақтар қалыңдап, олардың қисықтық радиустары артады. Өткір пішінді болған артқы жиектердің де қалыңдығы артады. Су тамшыларының

концентрациясы  $1,16 \text{ г/м}^3$  болғанда, ұсынылған әдіс қалақшаның ішкі бетіндегі ( $y/c < 0$ ) мұз пішінін жеткіліксіз түрде болжайды, бірақ қалақшаның сыртқы бетінде ( $y/c > 0$ ) тәжірибелік деректермен сәйкес келеді. Су тамшыларының концентрациясы  $2,32 \text{ г/м}^3$  үшін берілген әдіс қалақшада пайда болатын мұздың пішінін дәл болжай алды.

Қалақшаны мұз басу пішіндеріне қатысты стационарлы емес әсерді түсіндіру үшін Reinert және т.б. [89] тербелмелі және статикалық қалақшаларын 10 минут бойы мұзданатын аэродинамикалық құбырда сынақтардан өткізді. Атықлау бұрышы  $5,6 \text{ Гц}$  жиілікпен  $5^\circ \pm 6^\circ$  диапазонында өзгеріп отырды. Авторлар қалақшада қос мұз мүйіздерін алу үшін қырау жағдайларын қолданды: желдің жылдамдығы  $V_\infty = 133 \text{ м/с}$ , су тамшыларының концентрациясы  $0,5 \text{ г/м}^3$ , су тамшыларының орташа диаметрі  $22 \text{ мкм}$ , қоршаған орта температурасы  $T_\infty = 259 \text{ К}$  және мұз басу уақыты  $t = 10 \text{ мин}$ . Дәл осындай мұз басу жағдайында атқылау бұрышы тұрақты  $5^\circ$  ретінде бекітілді. Статикалық және тербелген қалақшаларда алынған мұздың пішіндері айтарлықтай өзгешеленген жоқ. Тек мұз мүйіздерінің ұштарының елеусіз бұрышқа ығысуы ғана байқалды. Яғни, мұз басу уақыты тербеліс кезеңінен әлдеқайда ұзағырақ болғанда, мұз басу пішінінің лездік өзгерістері шамалы болатынын көрсетті. Хі және Qi-Jun [56] айналып тұрған тікұшақ роторында мұз басуға арналған сандық жобалау нәтижелері осыған ұқсас қорытынды берді. Стационарлы емес жобалауды орындаудың орнына, олар квазитұрақты болжамға сәйкес келетін нақты азимуттық бұрыштары үшін мұз басу пішіндерін жаңартты. Мұз басудың сандық әдіспен алынған пішіндері мұздың тәжірибелік пішіндерімен жақсы үйлесті. Дәл осындай қорытындыны жел турбинасы мұз басуын сандық жобалауда қолдануға болады. Бір жел турбинасы айналымының уақыты мұз басудың жалпы уақытынан айтарлықтай аз болғандықтан, мұз қалыңдығының лезде өзгеруі мұздың соңғы пішініне айтарлықтай әсер етпейді.

### **3.3 Мұз басқан жел турбинасының өнімділігін талдау**

Бұл тарауда жоғарыда ұсынылған сандық әдістің көмегімен айналып тұрған жел турбинасында мұздың пайда болуы және оның турбина өнімділігіне әсері талданды. 3.3.1-кестеде берілген екі қалақшалы жел турбинасын мұз басуын жобалау қоршаған ортаның келесі жағдайларында жүргізілді:  $LWC = 1 \text{ г/м}^3$ ,  $MVD = 20 \text{ мкм}$ , мұз басу уақыты = 30 мин және  $T_\infty = 265 \text{ К}$ .

3.3.1-суретте (а) және (ә) екі қалақшалы жел турбинасының қалақшаларында пайда болған мұздың пішінін және мұздың қалыңдығының сыртқы ( $y/c > 0$ ) және ішкі ( $y/c < 0$ ) беттеріндегі таралуын сипаттайды. Қалақшаның толық беті 3.3.1a-суретте көрсетілгендей мұзбен жабылған. Мұздануға байланысты қалақшаның жалпы қалыңдығы артады. Өткір артқы жиегі доғал пішіндес болады. Максималды қалыңдығы хорда ұзындығынан 22%-на дейін артады. Атап айтқанда, доғал артқы

3.3.1 кесте – Сандық әдісті валидациялау кезінде қолданылған екі қалақшалы жел турбинасының параметрлері

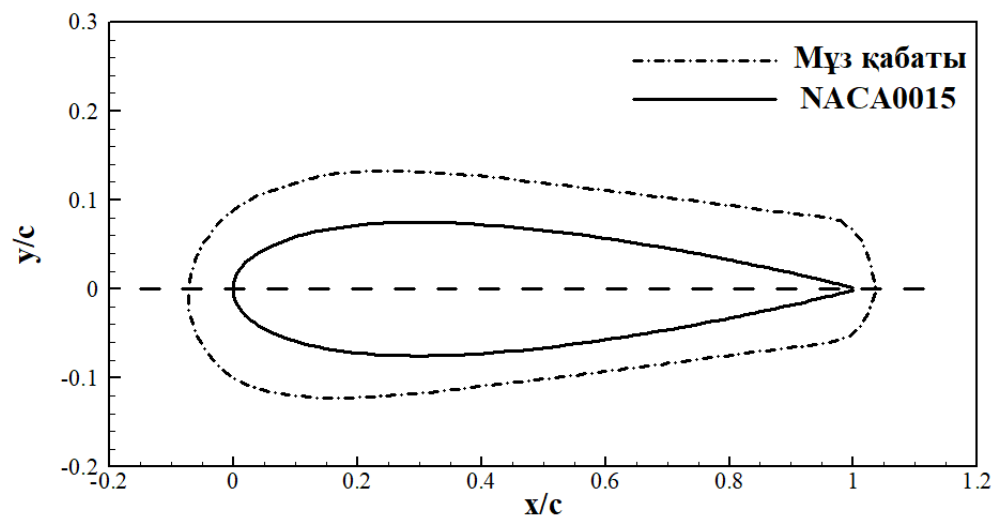
Параметр	Өлшемі
Қалақша саны	2
Аэродинамикалық профиль	NACA0018
Пішіні	Тік
Хордасы (м)	0,125
Турбина радиусы (м)	0,22
Қалақша биіктігі (м)	0,25

жиегі ағынның бөлінуіне және кедергінің күшінің артуына әкеліп соғады, ал аэродинамикалық сипаттамалар қалың қалақшаға (NACA0022) ұқсайды.

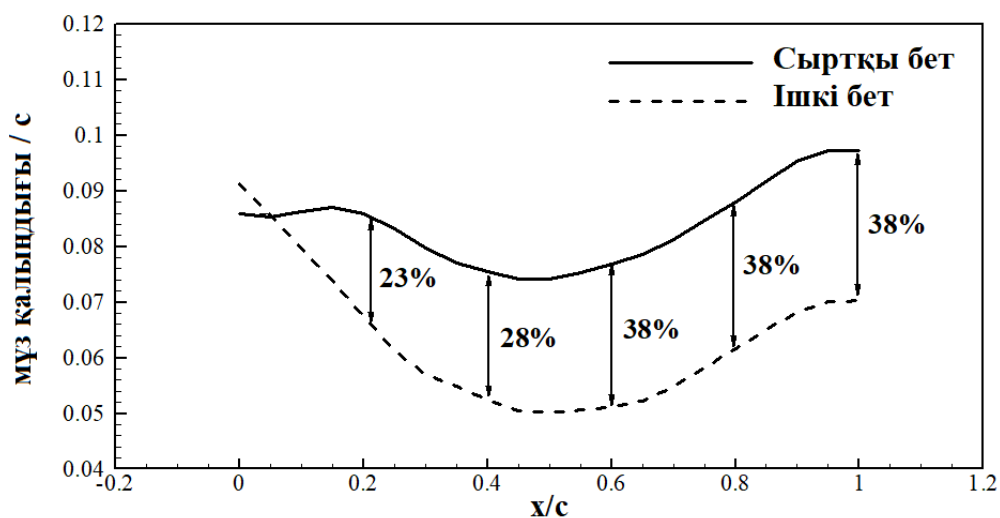
3.3.2 кесте – Сандық әдісті валидациялау кезінде қолданылған қоршаған ортаның параметрлері

Параметр	Өлшемі
Жел жылдамдығы (м/с)	4
Қоршаған орта температурасы (К)	265
Қоршаған ортаның қысымы (Па)	101325
Тамшылар диаметрі (мкм)	20
Су тамшылары концентрациясы (г/м <sup>3</sup> )	1,16; 2,32
Жалпы мұз басу уақыты (мин)	30
Жүрдектік	1

Осы зерттеуде алынған нәтижелер ғана емес, сонымен қатар тәжірибелік нәтижелер де [44] 3.3.2-кестеде көрсетілген мұз басу жағдайында мұздың қалақша бетімен біркелкі таралатынын көрсетеді. 3.3.1а-суретте және 3.2.3а-сурет - 3.2.3в-суреттерде нөлден төмен температураларда мұздың беті біркелкі, дүмпулерсіз екенін байқауға болады. Дегенмен, тік осьті жел турбинасы қалақшасының төмен қысым бөлігінде мұз бұдыры немесе мұз мүйізі болуы мүмкін. Ауа ағынының тоқырау нүктесінде су тамшылары көптеп жиналады. Қоршаған ортаның температурасы салыстырмалы түрде жоғары, бірақ кристаллдану жағдайында суыну қарқыны жеткіліксіз болса, түскен су тоқырау нүктесінде су қабықшасын құрайды. Қатпаған кері су қалақшаны бойлай ағады. Бұл кері су ағыны конвективтік салқындау жылдамдығы жоғары жерлерде қатып қалады. Минималды қысым аймағы мен конвективті салқындату жылдамдығының максимум мәндерінің орналасу жерлері жақын. Сондықтан, алдыңғы жиекке жақын үстіңгі бетте мұз мүйізі пайда болады. Вертикаль айналу өсі бар жел турбинасында қалақшаны атқылау бұрышы кең диапазонда өзгереді. Демек, тамшылардың жиналу мен конвективтік салқындату жылдамдығындағы шырлардың орны уақыт өте өзгереді. Сонымен, су тамшылары қалақшаның бетінде біркелкі таралады. Сондықтан, жел турбинасының қалақшаларында мұз бұдырлары немесе мұз мүйіздері пайда болмайды.



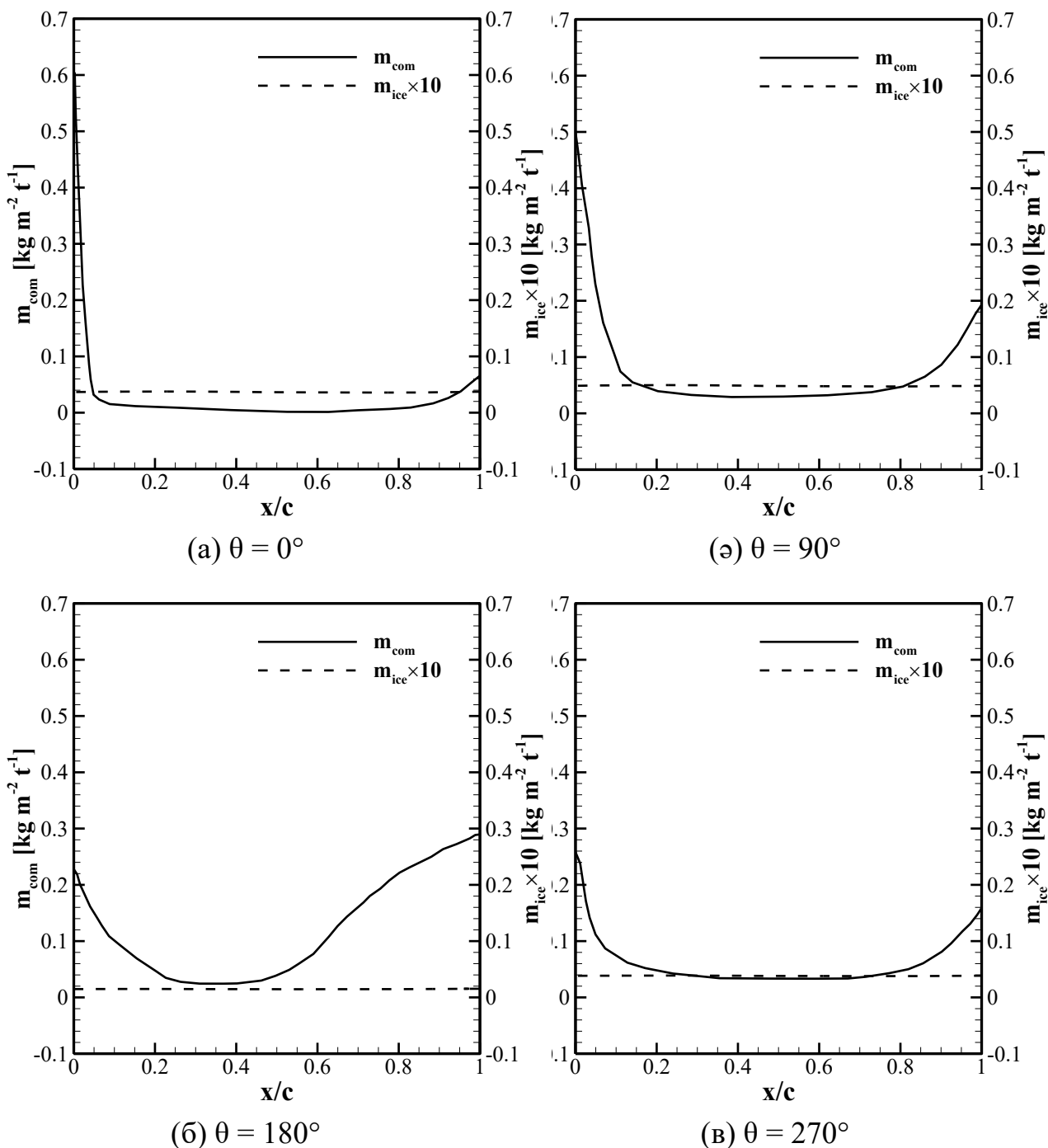
(а) Қалақшада пайда болатын мұз басудың пішіндері



(ә) Мұз қалыңдығының қалақша бетінде таралуы

3.3.1-сурет. 30 минуттан кейін жел турбинасы қалақшасындағы мұз басу ерекшеліктері

3.3.2-суретте  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  және  $270^\circ$  төрт азимуттық бұрыштар үшін қатқан мұз ( $m_{ice}$ ) және түскен су ( $m_{com}$ ) үшін масса ағынының таралуы көрсетілген. Азимуттық бұрыштарға сәйкес қатып жатқан мұздың және түскен судың масса ағынының таралуындағы өзгерістерді салыстыру үшін, 3.3.2-суреттегі мұз басу пішіндерін жаңартпай таза қалақшалары қолданылады. Дисертациялық жұмыста мұз басу жағдайын қарастыратындықтан, қатқан мұз бен су тамшылары арасында таралуы мен мәндері бойынша айтарлықтай айырмашылық бар. Жоғарыда айтылғандай, қатқан мұз барлық азимуттық бұрыштар үшін біркелкі таралуын көрсетеді. Дегенмен, тоқырау аймағында келген судың масса ағынының шыңдары байқалады. Сонымен қатар, қатқан су массасы азимуттық бұрыштарда және қалақшаның координаттарына қарамастан, тиген су тамшыларының массасынан әрқашан аз болады. 3.3.2 (а) - (в) суретте көрсетілгендей қатқан мұздың мөлшері судың мөлшерінен 10 есе аз.



3.3.2-сурет. Түрлі азимуттық бұрыштар үшін су тамшыларының және қатқан мұз массасының таралуы

Төмен жылдамдықты қалақша жағдайында қоршаған орта температурасы салыстырмалы түрде жоғары болғандықтан, судың кристалдануы барысында бөлінетін жылуды жою үшін конвективтік салқындату жеткіліксіз. Конвективтік салқындату жылдамдығы төмен жылдамдықтағы ұшақтарда да байқалды. Нақтырақ айтсақ, әртүрлі мұз басу жағдайында төмен жылдамдықтағы ұшақтарда мұз мүйіздері байқалмады [89].

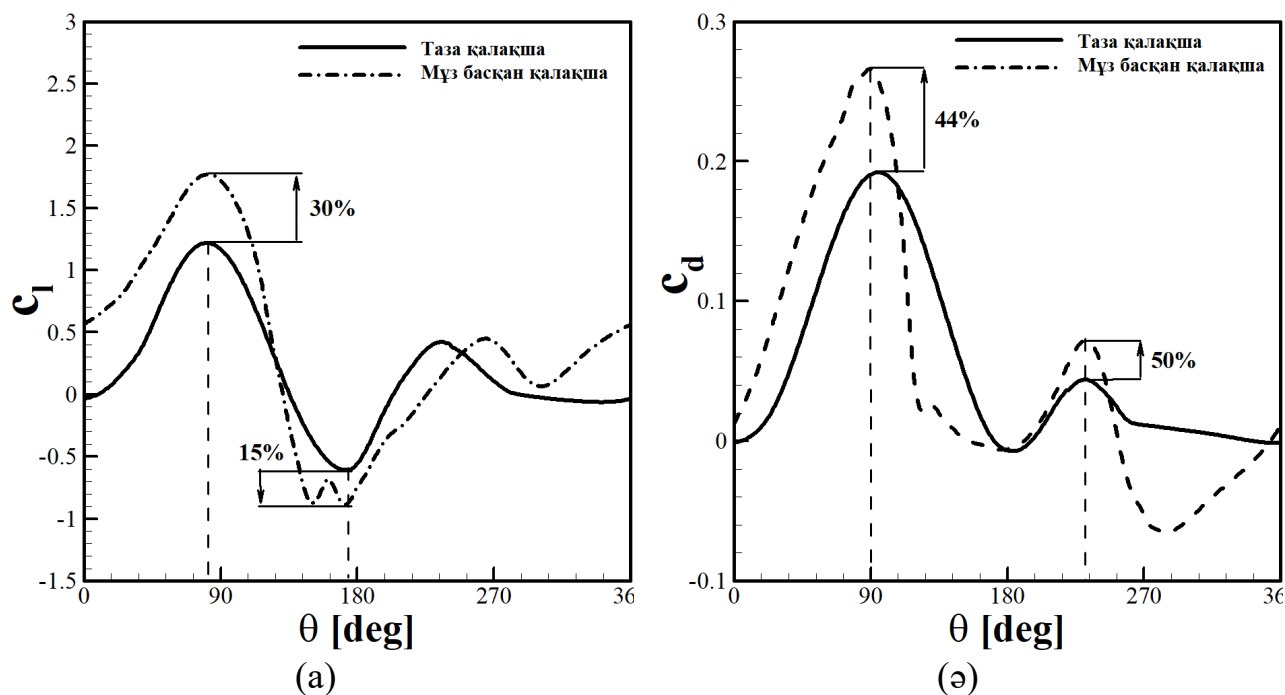
Қырау басу жағдайында су тамшылары бірден мұзға айналмай, қалақшаның бетінде қалады. Егер центрден тепкіш күш судың беттік керілу күшінен жоғары болса, су қабықшасы қалақша бетінен үзіліп кетеді. Бұл диссертациялық жұмыста мұндай жағдай қарастырылмайды. Дегенмен, әрбір азимуттық позицияның пішіні жаңартылған кезде, су қабықшасының қалыңдығы ескеріледі. Осылайша, қатпаған су қабықшасы жанама түрде жойылады. Есептеу қорларын азайту үшін үлкен  $\Delta\theta$  және  $\Delta t$  пайдаланылса, судың қалақша бетінен ажырауын елемеуге болады.

Сандық жобалауда асимметриялық мұз пішінін байқауға болады. 3.3.1ә-суретте көрсетілгендей, қалақшаның сыртқы бетіндегі мұздың қалыңдығы  $x/c = 0,4$  кезінде ішкі бетіндегіден мұздың қалыңдығынан 28%-ға артық. Қалақшаның ортасынан тыс ( $x/c > 0,5$ ) жерде, сыртқы және ішкі беттердің қалыңдығының айырмашылығы 38% құрайды. Бұл айырмашылық тамшы өрісіндегі және мұз басу модульдеріндегі, сондай-ақ ағын өрісі модуліндегі айналу әсерін ескеру есебінен болады деп тұжырымдалды. Тамшы өрісі модулінде енгізілген салыстырмалы қозғалыс әдісі сыртқы бөлікте жоғары жылдамдықты болжайтындықтан, су тамшыларының соқтығысу жылдамдығы артады. Соқтығысқан судан жұқа су қабықшасы жылжымалы тор көмегімен жергілікті есептелген ауаның ығысу күшімен артқы жиекке жылжытылады.

3.3.3-суретте (а) және (ә) таза және мұз басқан қалақшалардың көтеру, кедергі коэффициенттері және жел турбинасының айналу моменті салыстырылды. Басты мақсат – мұз басудың өнімділікке әсерін бағалау. Мұз басқан қалақшаның қалыңдығы артуына байланысты оның көтеру коэффициенті таза қалақшаға қарағанда 30%-ға жоғарылайды. Алайда, периодтың екінші ширегінде мұз басқан қалақшаның көтеру коэффициенті 15%-ға төмендейді. Сонымен қатар, мұз басқан қалақшаның кедергі коэффициентінің екі максимумы  $\theta = 90^\circ$  және  $\theta = 240^\circ$  азимуттық бұрыштарда байқалады. Көтеру коэффициенті кедергі коэффициентінен 10 есе артық, сондықтан жел турбинасы моментін жасауда көтеру күші басым болады.

3.3.4-суретте көрсетілгендей, таза және мұз басқан қалақшалардың момент коэффициентінде айтарлықтай айырмашылықтар бар. Таза қалақша үшін момент коэффициентінің максималды мәнін  $\theta = 100^\circ$  кезінде байқауға болады, дегенмен, мұз басқан қалақша аталған максимум шамамен  $\theta = 80^\circ$  шамасында байқалады.  $\theta=80^\circ$  кезінде мұз басқан қалақша үшін момент коэффициентінің ең жоғары мәні таза қалақша мәнінен 18%-ға аз. Периодтың екінші ширегінде ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ) таза қалақша моментінің коэффициенті бірте-бірте азаяды және  $\theta = 180^\circ$  кезінде шамамен  $c_m = -0,05$  жетеді, ал мұз басқан қалақшаның момент коэффициенті шамамен  $\theta=150^\circ$  кезінде  $c_m = -0,33$  күрт төмендейді. Атап айтқанда, мұз басқан қалақша шамамен  $\theta=240^\circ$  шамасында екінші максимум байқалады, ал таза қалақша айналымның екінші жартысында ( $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ) біркелкі момент коэффициентін көрсетеді. Периодтың екінші жартысында мұз басқан қалақшаның айналу моменті таза қалақшамен салыстырғанда жоғары болса да,





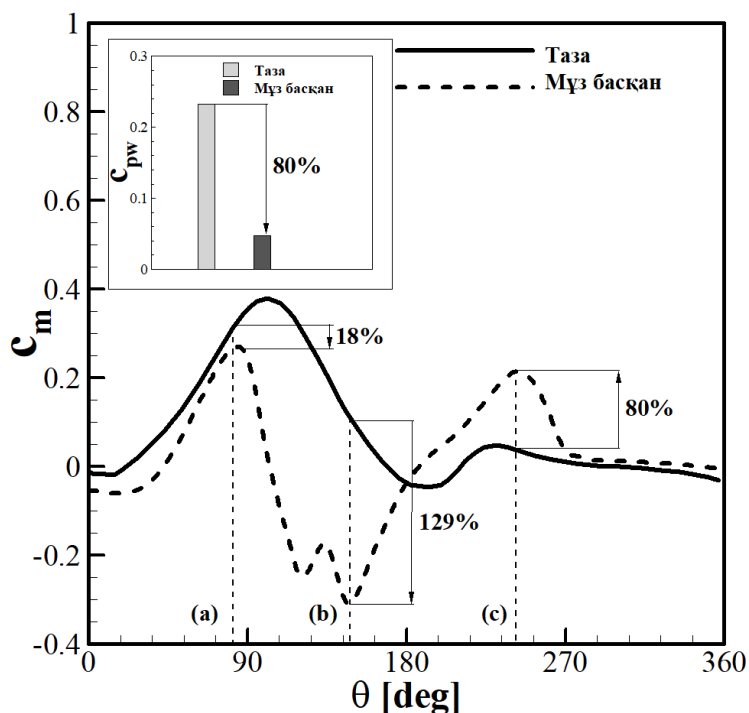
3.3.3-сурет. Таза және мұз басқан жел турбинасының аэродинамикалық қасиеттерін талдау. (а) көтеру коэффициенті, (ә) кедергі коэффициенті

мұз басқан қалақшаның бір айналымдағы орташа моменті таза қалақшаның бір айналымдағы орташа моментінен төмен болады.

Басқаша айтқанда, 3.3.4-суреттегі шағын жолақ диаграммасында көрсетілгендей, таза қалақшаны пайдаланған кездегімен салыстырғанда, жел турбинасының мұз басқан кезде, өндіру қуаты 80%-ға төмендеуі мүмкін

Мұз басқан турбинаның қасиеттерінің айтарлықтай айырмашылықтар байқалатын нүктелерде, атап айтқанда:  $\theta = 80^\circ$ ;  $150^\circ$  және  $240^\circ$  азимуттық бұрыштарда, айналу моментінің өзгеру себептерін түсіндіру үшін таза және мұз басқан қалақшалардың қысымының таралуы және құйын контурлары тиісінше, 3.3.5-суретте (а)-(б) салыстырылды.

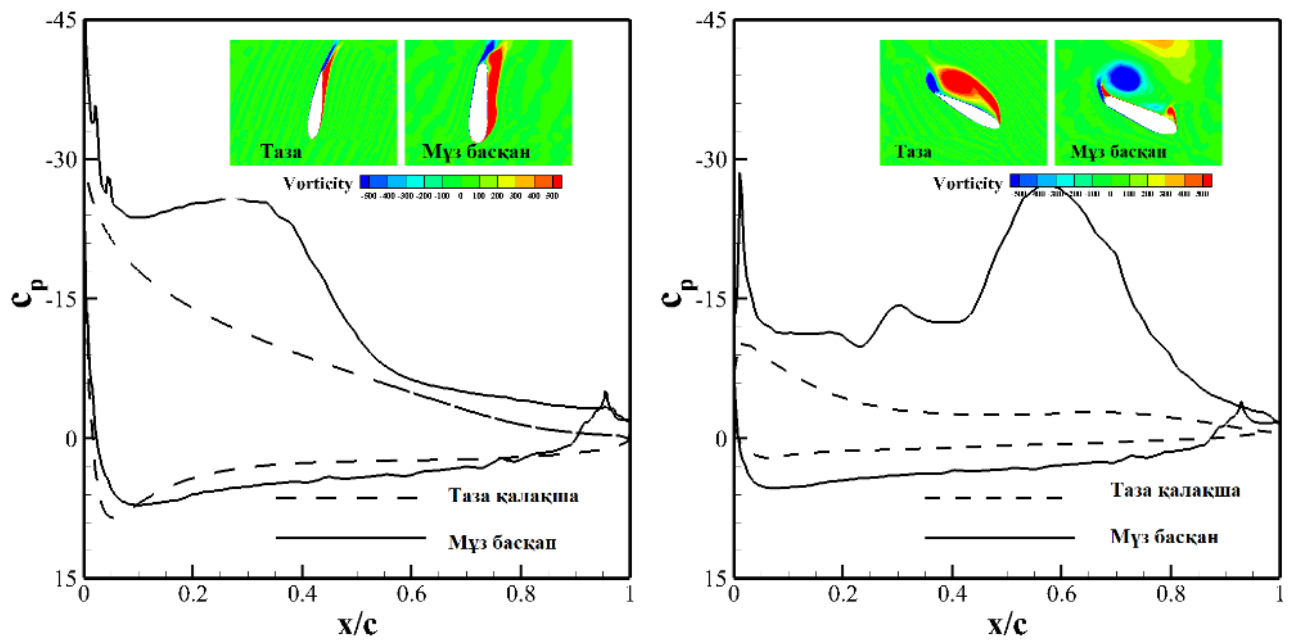
3.3.5а-суретте мұз басқан турбинаның максималды айналдыру моменті байқалатын,  $\theta = 80^\circ$  азимуттық бұрыштағы қысымның таралуы көрсетілген. Мұз басқан қалақшаның, үлкен кедергі күшін тудыратын қалың шекаралық қабаты бар; дегенмен, төмен қысым аймағында қысымның төмендеуіне байланысты мұз басқан қалақшаның көтеру күші таза қалақшамен салыстырғанда жоғары. Сондықтан, қалақша мұзбен қапталған болса да, шамамен бірдей айналу моментін береді. Қалыңдығы артқандықтан, мұз басқан қалақшада массивті ағынның ажырауы орын алады, бұл азимуттық бұрыштан кейін ( $\theta > 80^\circ$  және тиімді атқылау бұрышы  $> 22^\circ$ ) кейін момент коэффициентінің жылдам төмендеуін тудырады.



3.3.4-сурет. Таза және мұз басқан жел турбинының өнімділігін талдау

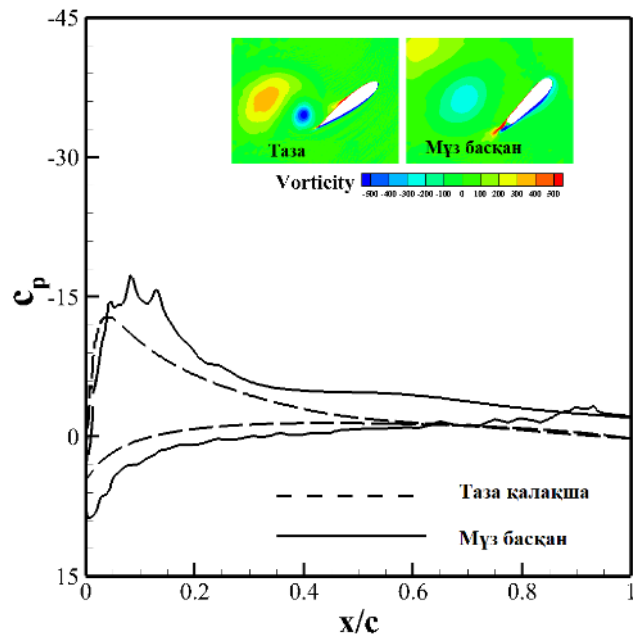
3.3.5а-суретте мұз басқан турбинаның минималды айналу моменті байқалады,  $\theta = 150^\circ$  (тиімді атқылау бұрышы =  $19^\circ$ ) азимуттық бұрыштағы қысымның таралуларын көрсетеді. Масса ағынының бөлінуі таза және мұзбен жабылған әуе қалқандары үшін  $\theta = 150^\circ$  кезінде байқалады. Мұз басуға байланысты әуе қалқанының қалыңдығының ұлғаюы өнімділіктің қатты төмендеуіне әкеледі.  $\theta = 150^\circ$  кезіндегі мұз басқан қалақшаның момент коэффициенті таза қалақшадан 129%-ға төмен. Артқы жиегінен бөлінген күшті құйын төмен қысым аймағында қалады. Мұз басқан қалақшаның төмен қысым жағындағы күшті құйыннан туындаған үлкен қысым градиенті кедергі күшін арттырады. Көтеру мен тарту күшін азайту мұз басқан жел турбинының өнімділігін айтарлықтай төмендетеді.

$\theta = 240^\circ$  азимуттық бұрышы үшін қысым коэффициенттері 3.3.5-суретте (б) көрсетілген. Мұз басқан және таза қалақшалардың беттеріндегі қысымның таралуында шамалы сәйкессіздіктерді байқауға болады. Суретте көрсетілгендей, екі әуе қалқанындағы шекаралық қабаттар динамикалық тоқырау салдарынан бетке жақсы жабысқан, дегенмен тиімді атқылау бұрышы  $\theta = 240^\circ$  үшін  $26^\circ$  мәнге ие, бұл статикалық тоқырау бұрышынан үлкен. Динамикалық тоқырау ағынның бөлінуіне жол бермейтіндіктен, айналымның екінші жартысында қалақша көтеру күшін сақтай алады [54–56].



(a)

(e)



(б)

3.3.5-сурет. Таза және мұз басқан қалақшалардың қысымының таралуы және құйын контурлары

Бірдей атқылау бұрыштарында жуан және жіңішке қалақшалардың жуанында көтеру күші артығырақ болады. Сол себепті мұз басқан қалақша шектеулі азимуттық бұрыштарда ( $180^\circ < \theta < 270^\circ$ ) жоғары өнімділік көрсетеді. Яғни, 3.3.5б-суретте көрсетілген қалақша мұзбен жабылған жағдайда, момент коэффициентінің екінші жоғары шыңы алынады. Алайда, бұл құбылыс жалпы өнімділікке ықпал етпейді, себебі екінші қалақша  $\theta = 60^\circ$  азимуттық бұрышта

орналасқан, мұнда таза қалақшамен салыстырғанда жел турбинасының өнімділігі төмен.

Берілген бөлімде айналып тұрған Дарье жел турбинасы қалақшасында мұз басу барысы сандық әдіспен жобаланып, тәжірибелік нәтижелермен валидацияланды. Айналмалы қозғалыс барысында жел турбинасының қалақшалары толықтай мұзбен қапталды. Нәтижесінде қалақшаның қалыңдығы 18% дейін артты. Осының салдарынан турбинаның айналу моменті күрт нашарлап, қуат өндіру қабілетінің 80% жоғалтады.

Келесі бөлім Дарье жел турбинасының қуыс элементтерінде табиғи желдету негізінде жылулық қорғаныс жүйесін ұсынуға арналады.

## 4 ЖЫЛУЛЫҚ ҚОРҒАУЫ БАР 1 КВТ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫН ЖОБАЛАУ

### 4.1. Дарье жел турбинасының қуыс элементтерінде табиғи желдету құбылысын зерттеу

Шұғыл континенталды аймақтарда орналасқан Дарье жел турбинасын мұз басудан қорғау үшін оның қалақшасының толық бетін жылыту керек. Жылыту элементтерін қалақшаның бойымен орналастыру экономикалық және техникалық тұрғыдан тиімсіз: Дарье турбинасының өзіндік құнын күрт қымбаттатады сонымен қатар, қыздыру элементтері едәуір энергияны талап етеді. Бұл мәселенің бір шешімі жел турбинасының қуыс элементтерін жылы ауаны тасымалдауға негізделеді [90]. Аталған әдістің негізінде турбинаның қуыс элементтерінің табиғи желдетуі жатыр. Турбина айналған кезде серперді бойлай, шетінде атмосфераға шығатын саңылауы бар жұмыс қалақшаларына бағытталған центрден тепкіш күш пайда болады:

$$F = \rho \omega^2 l \quad (4.1.1)$$

мұндағы,  $\rho$  - ауаның тығыздығы,  $\omega$  - бұрыштық жылдамдық,  $l$  - серпер ұзындығы.

Центрден тепкіш күш серпер ішіндегі ауаны турбинаның жұмыс қалақшаларына ауыстырады және сыртқы айналу білігі мен жел электр қондырғысының тіреуі арасында орналасқан тік айналмалы каналда төмен қысым аймағын тудырады. Осылайша жылы ауа атмосфераға шығады (4.1.1-сурет). Демек, серпердің айналмалы қозғалысы кезінде жел турбинасында табиғи желдету пайда болады.

Табиғи желдетуді тудыратын қысымдар айырымы төмендегі формуламен анықталады:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho \omega^2 \frac{l^2}{2} \quad (4.1.2)$$

Серпер каналындағы ауаның қозғалысын қарастыру кезінде үйкеліс күшін де ескерген жөн:

$$P_2 - P_1 = \frac{\lambda_1 l_1 \rho u_1^2}{2d_1} \quad (4.1.2)$$

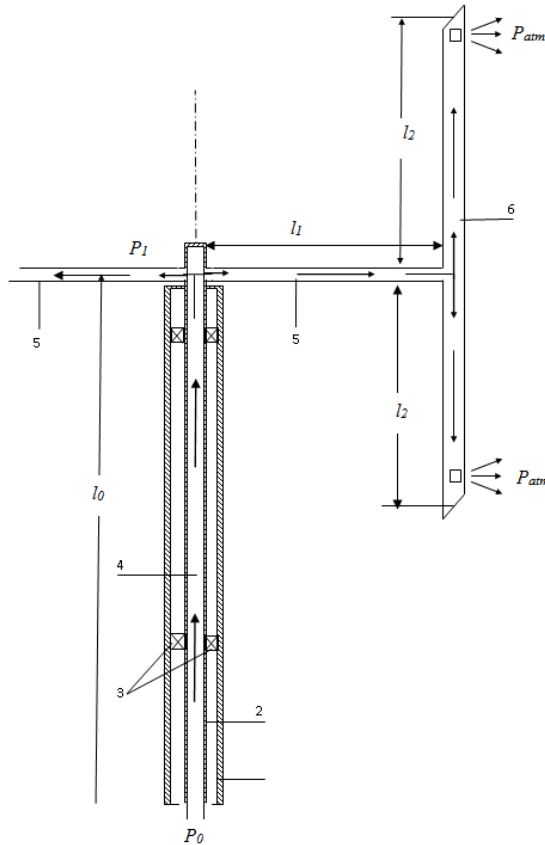
мұндағы  $\lambda_1$  – гидравликалық кедергі,  $d_1$  – серпер каналының эквивалентті диаметрі,  $u_1$  – орташығындық жылдамдық.

Үш қалақшалы жел турбинасының серпері бойындағы ауа массасының ығысуына кететін центрден тепкіш күштің тұтқыр кедергі күшін жеңуге кеткен жұмысты шегергендегі әр секундтағы мәні:

$$A = 3 \left( \rho \omega^2 \frac{l^2}{2} - \frac{\lambda_1 l_1 \rho u_1^2}{2d_1} \right) \cdot u_1 \quad (4.1.3)$$

Жел турбинасының табиғи желдетуі мүмкін болуы үшін ауа массасын қозғалтуға кеткен жұмыс айналмалы каналдағы және жұмыс қалақшасы ішіндегі үйкеліс күшінің жұмысынан артық болған жағдайда мүмкін болады:

$$\left( \rho \omega^2 \frac{l^2}{2} - \frac{\lambda_1 l_1 \rho u_1^2}{2d_1} \right) \cdot u_1 \geq \frac{\lambda_0 l_0 \rho u_0^3}{2d_0} + \frac{\lambda_2 l_2 \rho u_2^3}{2d_2} \quad (4.1.4)$$

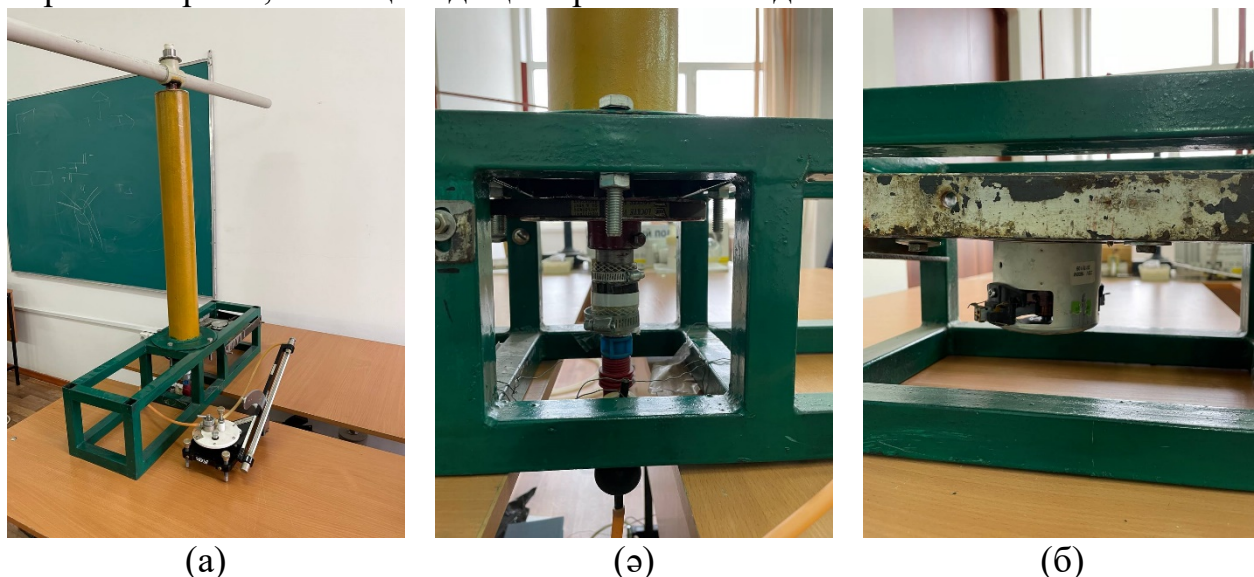


4.1.1-сурет. Дарье жел турбинасының табиғи желдетуі

Зертханалық Дарье жел турбинасы (4.1.2а-сурет) төменгі ұшы темір тірекке болттармен (4.1.2ә-сурет) бекітілген тіректен тұрады. Айналу білігі (3) тіректің (2) ішінде орналасқан, оның ұзындығы 1,13 метрді құрайды. Айналу білігіне тік бағытталған, диаметрі 25 мм пластик құбырдан жасалған серперлер бекітілген (4). Айналу білігі мен серперлер қуыс элементтермен байланысады.

Турбинаның айналмалы қозғалысын тудыру үшін зертханалық модельге реттеуші бір фазалы автотрансформатормен байланысқан, сорғының электр қозғалтқышы жалғанған (4.1.2б-сурет). Автотрансформаторға берілетін кернеу 15В пен 50В-ке дейін өзгертіліп отырды. Нәтижесінде, зертханалық модельдің айналу жылдамдығын өзгертуге қол жеткізілді. Турбинаның айналым саны лазерлі тахометр көмегімен өлшенді.

Ауа шығынын есептеу үшін қысымдар айырмасы белгілі болуы керек. Турбинаның айналмалы қозғалысы кезінде центрден тепкіш күштердің әсерінен төмен қысым аймағы туындайды. Сәйкесінше ауа ағынының кинетикалық энергиясы артып, потенциалдық энергиясы кемиді.



4.1.2-сурет. Тәжірибелік қондырғы

Тәжірибе барысында қысымдар айырмасын есептеу үшін диаметрі 3,5 мм болатын екі түтік дәнекерленген шайба және микроманометр пайдаланылды. Шайбаның (+) түтігі артық қысымды, (-) түтігі қысымның төмендеуін есептеуге көмектесті.

Тәжірибелік есептеудің нәтижелері 4.1.1-кестеде келтірілген. Каналдың кірісіндегі ауаның жылдамдығы төмендегі формулалар бойынша есептелді [91]:

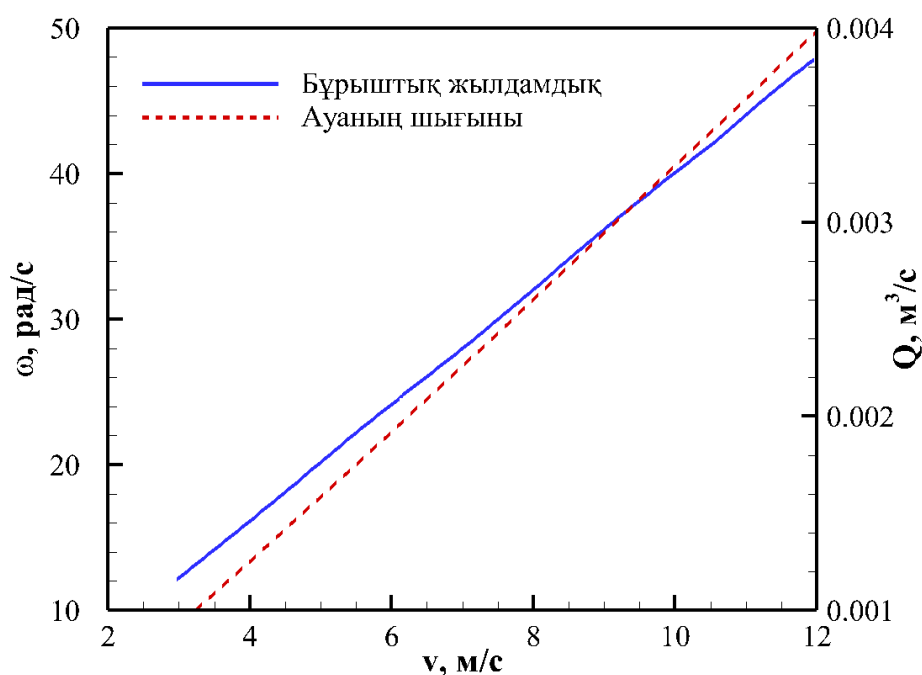
$$u = 0.0415 \sqrt{\frac{2gkn}{\rho}} = 0.13 \sqrt{\frac{2kn}{\rho}} \quad (4.1.5),$$

мұндағы,  $\rho = 1.181 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  ауаның қалыпты жағдайдағы және бөлме температурасындағы тығыздығы.

Тәжірибелік мәліметтердің көмегімен, каналдағы ауа жылдамдығының турбинаның айналу жылдамдығына тәуелділігі тұрғызылды (4.1.3-сурет). Желдің жылдамдығы бірқалыпты артқан кезде каналдың ішіндегі ауа шығыны сызықты өсе бастайды. 3 м/с жылдамдыққа дейін ауа шығыны болмайды, ал жел жылдамдығының 12 м/с мәнінде ауа шығын максимал мәнге жетеді. Демек, айналып тұрған жел турбинасының қуыс элементтерінде табиғи желдету бар және оны жел турбинасының жылулық қорғанысын жобалауға қолдануға болады.

#### 4.1.1-кесте. Тәжірибелік мәліметтер

U, В	h, мм			<h>	n, айн/мин			<n>	v, м/с
15	5	5	5	5	55	54	54	54	0.00535
20	11	12	11	11.3	78	78.7	77	77	0.00804
25	18	17	16	17	97	96	97	96.7	0.00986
30	24	22	23	23	112	111	111	111	0.011
35	28	28	28	28	125	125	125	125	0.013
40	34	33	33	33.3	136.2	137	136	136.4	0.014
45	40	39	40	39.6	146	144	145	145	0.015
50	44	46	45	45	154	155	154	154.3	0.016



4.1.3-сурет. Турбинаның айналу жылдамдығы мен ауа шығымының желдің жылдамдығына тәуелділігі

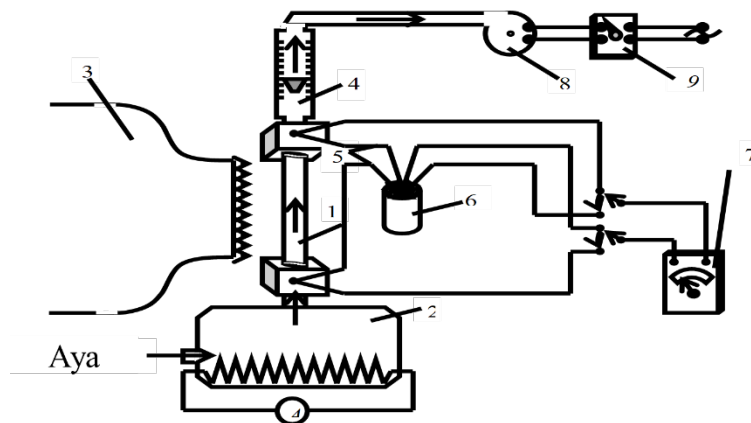
Келесі кезекте, жел турбины қалақшасының ауа ағынымен әрекеттесуін зерттеу мақсатында қалыңдығы 1 мм болатын мыс пластинадан NASA0021 аэродинамикалық профилінің кішірейтілген макеті жасалды (4.1.4-сурет). Қалақшаның ұзындығы  $l = 35$  см, хордасы  $c = 0,325$  см. Тәжірибелік үстелдің ортасында қалақшаны аэродинамикалық құбырға ( $0,3 \times 0,12$  м<sup>2</sup>) кез келген атқылау бұрышымен орналастыруға болатындай арнайы бұрушы механизм орнатылды. Қалақшаның ішкі қуысы арқылы муфельді пешпен қыздырылған төрт түрлі жылдамдықпен ( $0,00103$  м<sup>3</sup>/с,  $0,00153$  м<sup>3</sup>/с,  $0,00203$  м<sup>3</sup>/с,  $0,00253$  м<sup>3</sup>/с) ауа ағыны өтті [92, 93].

Қозғалыстағы қалақшаның ауа ағынына жылу беру барысы келесі теңдеулер жүйесімен анықталады [94]:



$$\left. \begin{aligned}
 q_l &= \rho Q C_p (T_{0,l} - T_{1,l}) \\
 q_{лв} &= q_{ол} = \alpha_{лв} F_{лв} (\bar{T}_л - \bar{T}_{влл}) = \tau_{лв} C_p \frac{F_{лв}}{u_{ср}} (\bar{T}_л - \bar{T}_{влв}) \\
 \bar{T}_{влл} &= \bar{T}_{влл} - \frac{q_{л0} \Delta}{\lambda_l F_l} \\
 q_{лн} &= \alpha_{лн} F_{лн} (\bar{T}_{внн} - T_\infty) = \tau_{лн} C_p \frac{F_{лн}}{V} (\bar{T}_{внн} - T_\infty)
 \end{aligned} \right\} (4.1.6)$$

(4.1.6) жүйесіндегі бірінші теңдеу – қалақшаның серпермен байланысқан жерінен атмосфераға шығатын саңылауға дейінгі аралықта жоғалтатын жылуы; екінші теңдеу – каналдың қабырғаларын жылытуға кеткен жылу мөлшері; үшіншісі – қалақшаның ұзындығы бойынша орташаланған канал қабырғасындағы температура айырымы; төртіншісі – қалақшаның сыртқы қабырғасымен қоршаған ортаға берген жылу мөлшері.

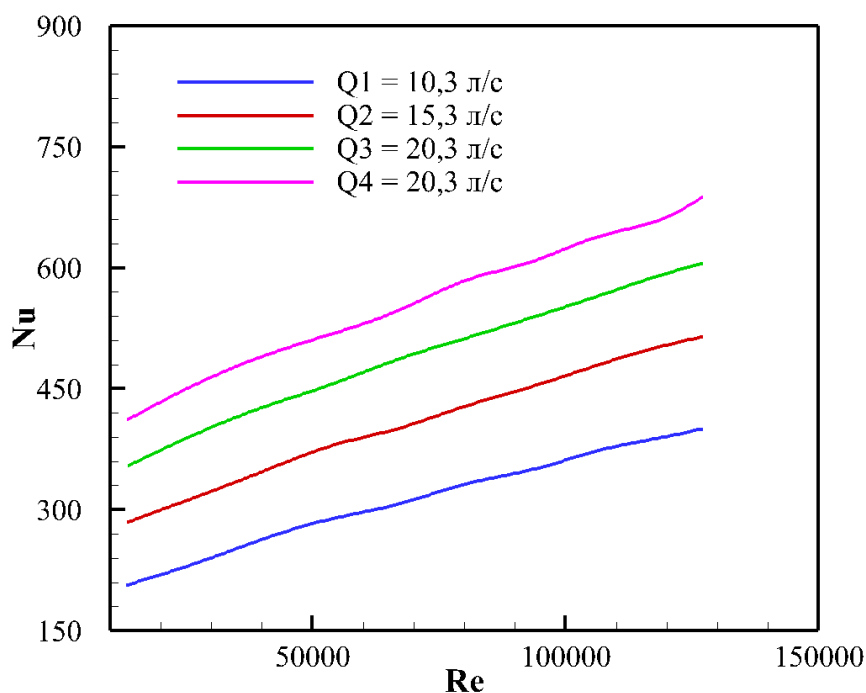


4.1.4-сурет. Тәжірибелік қондырғы. 1- NACA0021 қалақшасы; 2-муфельді пеш; 3-аэродинамикалық құбыр; 4-ротаметр РМ; 5-мысконстантан термоқосағы; 6-мүз; 7-гальванометр; 8-шаңсорғыш; 9-трансформатор.

Кез-келген материалдан жасалған NACA0021 пішінді, кез-келген қалыңдықта жасалған аэродинамикалық қалақшаның жылу беруінің тәуелділігі келесі өрнекпен анықталады [94]:

$$Nu_n = (0.32 - 9 * 10^{-6} Re_u) \frac{\Phi Re_u + 0,0128 d_s Re_v^{0.8} Re_u^{0.488}}{l} \quad (4.1.7)$$

Осы ақпаратты қолдана отырып, ауа ағынының төрт түрлі шығыны үшін жылуалмасу қарқынының қалақшаның ішіндегі ауа ағынына тәуелділігі анықталды (4.1.5-сурет).



4.1.5-сурет. Қалақша бетінің конвективті салқындауының ауа жылдамдығына тәуелділігі [92, 93].

#### 4.2 Жылулық қорғанысы бар 1кВт жел турбинасының конструкциясы

Алдыңғы тарауда мұз басу кезінде Дарье турбинасының қалақшаларын толықтай мұз қабаты жабатыны анықталды. Сәйкесінше, жел турбинасының жылулық қорғанысы қалақша бетін толығымен қамтып, жылытуы тиіс. Жылыту элементтерін қалақша бетінде орнату немесе қалақшаны арнайы гидрофобты материалдармен қаптау турбинаның құнын жоғарылатып, энергия өндірісін төмендетеді. Осы тарауда жел турбинасы элементтерінің ішкі желдетуі негізінде жылулық қорғаныс тәсілі ұсынылады.

Диссертациялық жұмысты орындау барысында, қуаты 1кВт жел турбинасы жобаланды. Ол үшін желдің орташа жылдамдығы 6-7 м/с деп есептелді. Жел энергиясын максималды қолдану коэффициенті  $\xi = 0,45$ , ал жүрдектік коэффициенті  $\chi = 4 - 5$  деп алынды.

Жел турбинасының  $N$  қуаты, жұмысшы қалақшалары тік жел турбинасының генераторына берілетін, жұмысшы қалақшаның жүріп өтетін жолының жасайтын  $S$  ауданына, желдің кинетикалық энергиясына  $\frac{\rho u^2}{2}$  және жел энергиясын пайдалану коэффициентіне  $\xi$  тура пропорционал [95]:

$$N_m = \xi S \rho \frac{u^3}{2} \quad (4.2.1)$$

U - жел жылдамдығы, S – турбина бір айналым жасағандағы беттің ауданы. U=7м/с болғанда 1 м<sup>2</sup>-қа келетін желдің меншікті қуаты  $N_T=221,2$  Вт. Жел турбиначасы осы қуаттан әрбір шаршы метрден турбина 100Вт қимасын ала алады және 1 кВт-ты турбина үшін S=10 м<sup>2</sup> болу керек, яғни жұмыс қалақшалары 2,5 метрдей, ал серпердің ұзындығы 2 м артық болуы керек. Серпер 1 м-ден кем емес биіктікте орналасу керек. Жеңілдету үшін S=16 м<sup>2</sup>, яғни 4м\*4м деп аламыз. Сонда серпер мен қалақшаның хордасы b=0,35 м болады. НАСА0021 аэродинамикалық профилінің Ф периметрінің b хордаға қатынасы шамамен 2,1-ге тең. Мұндай жағдайда олардың аудандарының қимасы  $f_l = 0,14$  мм,  $d_l = 0,28$  м. Егер U = 2м/с деп алсақ, онда серпердің  $l_l$  қуысының ішіндегі Рейнольдс саны  $Re = 37333$ .

Жұмыс қалақшаларының ұзындығы 2,5 м, ал серпердің ұзындығы 2м тең болғанда орталық тіреудің диаметрі 75 мм деп алынды. Онда ішкі диаметрі 36 мм және сыртқы диаметрі 40 мм болатын (ОСТ НКСМ 6121-39) подшипник қолданылды. Айналымалы қуыстың эквивалентті диаметрі 62 мм, ал оның көлденең қимасының ауданы 0,008 м<sup>2</sup>. Осы каналдағы ауа қозғалысының орташа жылдамдығы 3 м/с, Рейнольдс саны  $Re_0=20000$  және  $\lambda_0=0.054$ . Осы мәндерді қолдану кезінде турбинаның табиғи желдетуі орындалуы үшін  $\omega \geq 1,31$  рад/с бұрыштық жылдамдықпен айналуы жеткілікті болатыны анықталды. Сонымен, турбинаның өздік желдетуі үшін 12 айн/мин жеткілікті, жел жылдамдығы 7 м/с кезінде, турбина үшін  $\omega = 7,875$  рад/с немесе 75 айн/мин жеткілікті болды. 12-15 м/с қатты жел жылдамдықтарында жел турбиначасы 129-161 айн/мин мәнге ие болады. Яғни, центрден тепкіш күш турбинаның өздік желдетуін тудыруға әбден жеткілікті. Жылулық қорғанысы бар жел турбиначасының конструкциясы 4.2.1-суретте бейнеленген.

Ротордың айналу осі тік ЖЭК-тің негізгі кемшілігі – ұзын білікті дайындаудың күрделілігі және оны мойынтірек тіреулеріне тігінен орнату. Тіреулерді жасау да күрделі технологиялық міндет, тіректердің бір осьте болып, олардың беріктігін қамтамасыз ету қажет. Конструкцияның тағы бір кемшілігі біліктің ауыр салмағы, ол төменгі айналатын тіреуді басып тұратындықтан, қондырғының пайдалы әсерінің коэффициентін азайтатын үлкен үйкеліс моментін тудырады [96]. Мұндай білікті дайындау және оны корпусқа орнату қиын жұмыс екені анық. Бұл мәселенің кейбір шешімі ретінде қондырғының модульдік нұсқасы қолданылады. Ол бірнеше бөліктерден – модульдерден жасалған, содан кейін орнында тұтас етіп жиналады.



4.2.1-сурет. Қуаты 1 кВт жылулық қорғанысы бар жел турбинасы

Диссертацияны орындау барысында жобалық-конструкторлық құжаттама әзірленді. Сонымен қатар, күрделі технологиялық мәселені шешудің тағы бір жолы ұсынылды. Ұзын айналмалы біліктен бас тартып, оны қысқа оське ауыстыру керек, ол осьте жел дөңгелегі бекітілген екі мойынтірек айналады. Ұсынылған жел қондырғысының конструкциясын пайдалану жасау технологиясын жеңілдетеді. Ескі конструкцияда астында және үстінде екі жерден бекітілуі тиіс ұзын айналмалы тік білік болуы қажет болған. Қуаты 1 кВт жел қондырғысы үшін ұзындығы шамамен 8 м болатын білік қажет. Білік ұзындығы ротордың ұзындығына тең десе болады. Жоғарыдан білік ротордан қысқа болуы мүмкін емес, өйткені жоғарғы білік тіреуін бекіту қажет, әдетте, бұл қатты тартылған сым арқандар болған. Бір осьте және қатты болуын қамтамасыз ете отырып, мұндай білікті жасау ең қиын технологиялық міндет екені түсінікті, ол үшін осындай ұзын дайындамаларды қажетті дәлдікпен жасауға қабілетті арнайы токар станогі қажет. Мұндай білікті орнату және жоғарғы нүктеде тіреуді қамтамасыз ету қиын, сондай-ақ бұл жел қондырғысының өзіндік құнына да әсер етеді. Ұсынылған схеманың артықшылығы табанға бекітілген қатты тіреу орнатылады (Қосымша А), ондағы орнату орындарының бір ось бойында болуын қамтамасыз ету қажет. Мойынтіректердің арасындағы қашықтық тірек биіктігінен 2-3 есе кем болуы мүмкін. Жаңа конструкцияда білік ұзындығы 1,0 м болатын, салыстырмалы түрде қысқа, бірақ қатты корпус ішінде айналады.

Мойынтіректердің осьтік сәйкессіздігі де 1-2 мм үлкен мәнде болуы мүмкін. Алайда, бұл қателік қалақшаның серпімді деформациясының арқасында компенсацияланады.

Білік үшін жоғары конструкциялық талаптар қажет емес, өйткені біліктің өзіндік беті жоқ. Осы факторлардың барлығы жел электр қондырғысын жасау технологиясын айтарлықтай, шамамен 25-30%-ға жеңілдетеді. Роторлы жел қондырғыларын тәжірибеде кеңінен қолдануға кедергі келтіретін негізгі мәселе – оның ұзын тік білігі екенін атап өткен жөн. Сонымен бірге іші қуыс білігі бар қысқартылған конструкциясының салмағы ұзын біліктің салмағынан әлдеқайда аз, сондықтан олардың салмағының күші төменгі айналмалы тіректе әлдеқайда төмен үйкеліс моментін тудырады, бұл қондырғының пайдалы әсер коэффициентін сөзсіз арттырады. Бұл шешімді ротордың айналмалы тік осі бар жел қондырғысының кез келген схемасында қолдануға болады, мысалы, Савониус, Дарье, Эванс, Масгров жел турбиналары [96].

Конструкциясы қысқартылған жел қондырғысын технологиялық тұрғыдан бағалаудың бірқатар артықшылығы бар, өйткені конструкциясы шағын цехтарда өндіруге бағытталған, бұл технологиялық өзіндік құнды төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл конструкцияның артықшылығы – оны Қазақстанның шет аймақтарына да ауыл шаруашылығы мен шағын бизнесте қолдану үшін тасымалдауға болады.

Құрастыру конструкциясы 8 бөліктен тұрады (Қосымша А.1-сурет). Қысқартылған қатты тұтас шығыр 7 сыртқы корпусқа 8 орнатылады. Сыртқы корпус орнату платформасына 6 болттардың көмегімен бекітіледі. Барлығын тұтасымен конструкциясы мен биіктіктігі әртүрлі тіректерге орнатуға болады.

Жел қондырғысының қалақшалары 1 мен серперлері 2 алюминийден жасалып, аргон дәнекерлегішпен айналу білігіне 4 бекітілген. Айналу білігі жұмыс сызбаға сәйкес бекіткішке 3 дәнекерленген. Қысқартылған айналу білігі 2 СТ 3 болаттан жасалған стандартты қабырғасы қалың құбырдан жасалады.

Қосымшаның А.2-А.5 суреттерінде жылу қорғанысы бар қондырғының жеке бөліктерінің дайындалған сызбалары мен жекеленген бөліктерінің суреті көрсетілген. Осы сызбаларға сәйкес мұз басуға қарсы жүйесі бар ЖЭҚ бөлшектері жобаланып жасалған.

Жел энергия қондырғысының бөлшектері конструкциясының технологиялық қабілеті еңбек өнімділігіне, өндірісті технологиялық дайындауға, өнімді дайындауға, оған техникалық қызмет көрсетуге және оны жөндеуге жұмсалатын уақытқа тікелей байланысты. Сондықтан бөлшектерді жасау бойынша технологиялық процесті жобалау алдында оның конструкциясының технологиялық қабілетіне талдау жасау және қажет болған жағдайда, технологиялық мүмкіндігін сынау қажет. Жел электр қондырғысының бөлшектері конструкциясының технологиялық қабілеті – сапалық және сандық деңгейде бағаланды. Жел электр қондырғысының конструкциясына талдау жасаған кезде сапалық және сандық бағалау нәтижесі бөлшектердің конструкциясы келесі талаптарға сәйкес келетінін көрсетті:

- ЖЭҚ конструкциясында бөлшектердің құрамы стандартты және бірегей конструкция элементтерінен құралған;

- ЖЭҚ бөлшектерін жасау үшін стандартты немесе бірегей дайындамалар қолданылады;

- ЖЭҚ бөлшектерінің өлшем дәлдігі мен бетінің кедір-бұдырлығы оңтайлы, негізделген, конструктивті және үнемді;

- ЖЭҚ бөлшектерінің қаттылығын, пішінін және өлшемдерін, сондай-ақ оның материалының механикалық және физикалық-химиялық қасиеттерін анықтау кезінде дайындау технологиясының мүмкіндіктері, сақтау және тасымалдау жағдайлары ескерілді;

- ЖЭҚ бөлшектерінің дәлдігі мен беттерінің кедір-бұдыры дәл орнатуды, өңдеуді және бақылауды қамтамасыз етеді;

- ЖЭҚ бөлшектерінің дайындамасы ұтымды жолмен алынуы керек (шығарылатын өнім көлемі мен өндіріс түрін ескере отырып);

- ЖЭҚ бөлшектерінің барлық конструкциясында өңделетін беттерге қол жеткізу және бірнеше дайындамаларды бір уақытта өңдеу мүмкіндігі қарастырылған;

- ЖЭҚ бөлшектері бетінің дәлдік дәрежесінің және кедір-бұдырының байланысы өңдеу әдістері мен құралдарына сәйкес келеді.

ЖЭҚ-тың бастапқы ақпаратын талдау (торапты құрастыру сызбасы, бөлшектің сызбасы, бағдарламасы және жылдық өнім мөлшері, өндіріс түрі, торап пен бөлшектің қызмет көрсету мақсаты) негізінде оның бастапқы дайындамасын алу әдісін түбегейлі өзгертуге болатындығы туралы қорытынды жасауға болады. Дайындамаларды алудың басқа әдістерінің сапасын салыстыру нақты таңдау жасауға мүмкіндік бермеген кезде ЖЭҚ бөлшектерінің технологиялық өзіндік құнын азайту үшін дайындамаларды алудың екі немесе үш қолайлы әдісіне сандық техника-экономикалық баға беріліп, бастапқы дайындаманы таңдау жөнінде шешім шығарылады. Бетінің конструкциясын талдау бойынша технологиялық өңдеу үшін қол жетпейтін жерлерді анықтау кезінде олар анықталмаған. Талдау арқылы қажетті дәлдіктің өлшемдерін қамтамасыз ету кезінде ЖЭҚ бөлшектерінің технологиялық және конструкторлық (өлшемдік) базасын біріктіру мүмкіндігі, сондай-ақ осындай өлшемдерді тікелей бақылау мүмкіндігі анықталды. Белгіленген рұқсаттар мен техникалық талаптардың бөлшектердің қызмет ету мақсатына және жабдықтың технологиялық мүмкіндіктеріне сәйкес келетіні талданады. Технологиялық база ретінде қолданылатын беттің сәйкестігі анықталып, олардың дайындаманың технологиялық базаларына қойылатын талаптарға сәйкестігі тексерілді. Қолда бар сызбалар арқылы нақты қондырғының жалпы массасы анықталады. Сонымен бірге әрбір бөлік үшін қондырғы жасалатын материалдар іріктеліп алынды.

Әрбір бөлшектің сызбасын пайдалана отырып, қондырғының жалпы массасын анықтау үшін алдымен бөлшектің көлемін анықтап алу қажет.

Материалды іріктеп алғаннан кейін бөлшектердің массасын анықтау қиын болмайды.

Ұзындығы 2 м және хордасы 0,5 м қалақ ГОСТ 4784-97 бойынша АД0 маркалы алюминийден немесе EN 573-3 бойынша 1050 маркалы, қалыңдығы 2 мм болатын алюминийден жасалады. X шамалары бар кесте деректерін пайдалана отырып, профильдің ұшынан басталатын қашықтық (салыстырмалы бірліктермен, 0-ден 1-ге дейін немесе пайыздармен),  $y_{in}$  - профильдің жоғарғы нүктесінің координатасы және  $y_n$  - профильдің төменгі нүктесінің координатасы (бұл да салыстырмалы бірліктермен немесе пайыздармен) НАСА-0021 симметриялы қанат профилі үшін қондырғының қалақ көлемі анықталды. Алюминийдің тығыздығы  $\rho=2712$  кг/м<sup>3</sup> шамасына тең. Осылайша, НАСА-0021 симметриялы қанат профилінің бір қалақшасының массасы  $m=11,366$  кг-ға тең. Бізде 3 қалақ болғандықтан, қалақтардың жалпы массасы  $m = 34,098$  кг болады.

Максималды ұзындығы 1 м және хордасы 0,5 м қалақ ГОСТ 4784-97 бойынша АД0 маркалы алюминийден немесе EN 573-3 бойынша 1050 маркалы қалыңдығы 2 мм болатын алюминийден жасалатын болады. Қондырғының ұзындығы 1,334 м және ішкі диаметрі  $d_b = 24$  мм болатын айналу білігі тығыздығы  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>, 30ХГСА маркалы, конструкциялық қоспалы болаттан жасалатын болады. Сызбаны пайдалана отырып, айналмалы біліктің көлемі есептелді. Білік көлемін материалдың тығыздығына көбейту арқылы біліктің массасы  $m=1,688$  кг екені анықталды.

Сызбаларды пайдалана отырып, сыртқы қаптаманың массасы анықталды, ол да тығыздығы  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>, 30ХГСА маркалы, құрылымдық қоспалы болаттан жасалды. Сыртқы құбырдың массасы  $m=17,34$  кг.

Нәтижесінде қондырғының барлық бөлшектерінің массаларын қосып, нақты қондырғының массасы анықталды –  $m=53,126$  кг.

ЖЭҚ бөлшектері корпусының технологиялық қабілетін қамтамасыз ету қарастырылады. Бөлшектердің корпусының дайындамаларын өңдеу негізінен цилиндрлік, тегіс беттерді және саңылауларды өңдеуге дейін алып келеді. Корпус бөлшектің конструкциялық формасы ең аз өңдеу жұмысын қамтамасыз етеді, ол келесі негізгі шарттарды қанағаттандырады:

- корпус бөлшектің пішіні дұрыс геометриялық пішінге сәйкес келеді;
- корпус бөлшектің көлденең қимасын дұрыс цилиндр пішініне келтірген жөн;
- корпус бөлшектің конструкциясы байланысатын бөлшекке түйістірмей өңдеуге мүмкіндік береді;
- бір операцияда бірнеше бетті механикалық жолмен өңдеу мүмкіндігі қарастырылған базалар бірлігі қамтамасыз етілген (мысалы, жазықтық және екі тесік);
- бөлшектің конструкциясы тесіп өтетін саңылаулардың беттерін және қапталын өңдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді;
- саңылаулардың қапталдарын қайрайтын кескімен өңдеуге ыңғайлы пішінге келтіру керек;

- бөлшекте үскінің қисаюына немесе оның сынуына жол бермеу мақсатында үскі кіріп-шығатын тесіктердің осьтеріне перпендикуляр емес беттері болмауы керек;

- ішкі қабырғалардағы өңделетін тесіктердің диаметрі бөлшектің сыртқы қабырғаларындағы бір ось бойындағы тесіктердің диаметріне тең немесе одан кіші болуы керек;

- бөлшектің конструкциясы беттерді сәйкестеуге кедергі келтірмейді.

Бөлшектің барлық өңделген беттері анықталды. Оларды өңдеу кезінде стандартты жабдықтар мен кескіш құралдар пайдаланылды. Әр бетті механикалық жолмен өңдеудің әртүрлі әдістері қарастырылған, өңдеудің ыңғайлылығы мен жеңілдігі бағаланды. Аралас байланыстар талданды. Егер бір координаталық бағытта олардың саны біреуден көп болса, онда олардың артықтарын басқа байланыс түрлеріне ауыстыру арқылы жойып отыру керек. Симметрия осьтері арқылы берілетін жасырын байланыстарға ерекше назар аударылды. Қарастырылып отырған бөлшек үшін конструкцияның технологиялық қабілетінің қазіргі уақыттағы мүмкін болатын көрсеткіштері анықталады. Жеке бөлшектердің конструкциясын жобалау кезінде пайдалану талаптарын ғана емес, сонымен қатар өнімді барынша ұтымды, әрі үнемді дайындау талаптарын қанағаттандыратын жағдайға қол жеткізу қажет. Технологиялық қабілет деп бөлшекті ең ұтымды және үнемді тәсілмен жасауға мүмкіндік беретін бөлшектің конструкциясы айтылады. Технологиялық қабілеттің негізгі критерийлері – бөлшекті жасаудың күрделілігі мен өзіндік құны. Бөлшекті жасаудың күрделілігі мен өзіндік құны неғұрлым төмен болса, үнемділік соғұрлым жоғарылайды. Жел энергия қондырғысының негізгі бөлшектерінің конструкциясының технологиялық қабілетіне жасалған талдау нәтижелері 4.2.1-4.2.5 кестелерде көрсетілген.

4.2.2-кесте бойынша қорытынды: 1 және 5 беттері үшін 7 дәлдік дәрежесіне (жоғары дәлдік) үш рет (қаралап, ақтап және жұқалап) жону арқылы, ал қалған беттер үшін 12 дәлдік дәрежесіне (орташа дәлдік) бір рет өңдеу (жонғылау, қапталын тегістеу, кесіп алу) арқылы қол жеткізіледі.

4.2.3-кесте бойынша қорытынды: цилиндрлік беттің кедір-бұдырлығына 4 шебер жону арқылы қол жеткізіледі, қалған беттердің кедір-бұдырлығына бір рет өңдеу (кесіп алу, қапталын қию, фрезерлеу) арқылы қол жеткізіледі.

4.2.4-кесте бойынша қорытынды: дайындама барлық жағдайда үш еркіндік дәрежесінен айырылады (базалар тек орнатылады). Базалардың тұрақтылығы мен базаларды біріктіру принципі жүзеге асырылады. Бөлшек конструкциясының технологиялық қабілеті өнімге қойылатын барлық талапқа сай келеді. Жоғарыда келтірілген талдау бөлшектің жалпы алғанда технологиялық қабілеті бар екенін көрсетті.



4.2.1-кесте – «Білік» бөлшегінің конструкциясының технологиялық қабілетіне талдау

Технологиялық қабілет көрсеткіштері	Технологиялық қабілетке қойылатын талап	Сызба бойынша ТКҚ талдауы	Технологиялық қабілет туралы қорытынды
1	2	3	4
1. Өңделетін беттер	Өзара параллель немесе өзара перпендикуляр болуы керек	Беттер өзара параллель немесе өзара перпендикуляр	Т
2. Өңделетін беттер	Өтпелі тесіктердің ішінде ойықтар болмауы тиіс	Өтпелі тесіктер жоқ	Т
3. Тесіктердің осьтері арасындағы қашықтық	Кемінде 25 мм болуы керек, бұл көп шпиндельді бұрғылау станоктарын пайдалануға мүмкіндік береді	Жоқ	Т
4. Бұрандалы беттердің ұзындығы	Бұранданың екі номиналды диаметрінен аспауы керек	Жоқ	Т
5. Ойықтардың орналасуы	Металл кесетін станоктарда өңдеу үшін қолжетімді болуы керек	Ойықтар өңдеу үшін қолжетімді	Т
6. Орнында өңдеу мүмкіндігінің болуы	Орнында өңдеу мүмкіндігі бөлшектердің конструкциясында болмауы керек	Бөлшек конструкциясында орнында өңдеу мүмкіндігі жоқ	Т
7. Беттің дәлдігі мен кедір-бұдырының сәйкестігі	Дәл өлшемді беттердің сәйкес кедір-бұдырлық параметрлері болуы керек	Дәл беттер кедір-бұдырлық параметрлерге сәйкес емес	Ш
8. Конструкциялық базалардың өлшемдері	Өлшемдері орналасудың үлгілік ережелеріне сай болуы керек	Өлшемдері орналасудың үлгілік ережелеріне сәйкес	Ш
9. Өңдеу әдістері	Бөлшектің конструкциясы бөлшекті жасау кезінде жоғары өнімді өңдеу әдістерін қолдануға мүмкіндік беретіндей болуы керек.	Жоғары өнімді өңдеу әдістерін қолдануға болады	Т

4.2.2-кесте – Конструкцияның технологиялық қабілетін дәлдік талаптары бойынша талдау

Беттің №.	Беттің атауы	Жалпы саны	Келесі дәлдік дәрежесіне сәйкес өңделетін беттердің саны	Өңделмейтін беттер	Орташа дәлдік	Еркін өлшем
1,2,3,4,5.	Сыртқы цилиндрлік беттер	5	1,5	жоқ	5	Жоқ
6,7,8,9,10	Қаптал беттер	5		жоқ		Жоқ
11,12	Ойықтар	2				
Барлығы		12				

4.2.3-кесте – Бөлшек конструкциясының технологиялық қабілетін өңделетін беттердің кедір-бұдырлық параметрлері бойынша талдау

Беттің №.	Беттің атауы	Жалпы саны	Келесі дәлдік дәрежесіне сәйкес өңделетін беттердің саны	Өңделмейтін беттер
1,2,3,4,5.	Сыртқы цилиндрлік беттер	1,5 2,3,4	7 9	жоқ
6,7,8,9,10	Қаптал беттер	5	11	жоқ
11,12	Ойықтар	2	11	жоқ
Барлығы		12		

4.2.4-кесте – Бөлшек конструкциясының технологиялық қабілетін база тұрақтылығының принципін орындау мүмкіндігінің сай келуі бойынша талдау

Беттің №.	База ретінде қолданылатын беттердің атауы	Орындалатын технологиялық операциялар	Қолданылатын базалар саны
3	Сыртқы беті	1. Қапталды қию 2. Цилиндрлік беттерді қаралап, ақтап және шебер жону 3. Қиып алу	1
1 және 5	Сыртқы бет (қосарлы бағыттаушы база) және қаптал (тірек базасы)	Ойықты жонғылау	1
1 және 5	Сыртқы бет (қосарлы бағыттаушы база) және қаптал (тірек базасы)	Қалақшаны жонғылау	1
Барлығы	3		

4.2.5-кесте – Бөлшек конструкциясының технологиялық қабілетін базаларды біріктіру принципін орындау мүмкіндігіне сай келуі бойынша талдау

Базалық беттердің №	Өңделетін беттердің атауы	Базаларды біріктіру принципін жүзеге асыру	Негіздеме
3	150 <sup>-0,4</sup>	Иә	Конструкторлық, технологиялық және өлшемдік базалар біріктіріледі
	Ш50 <sup>-0,025</sup> , Ш35 <sup>-0,025</sup> , Ш20 <sup>-0,021</sup>		
1, 5	10 <sup>+0,15</sup> , 100 <sup>-0,35</sup> , 40 <sup>-0,25</sup>	Иә	
	40 <sup>-0,25</sup> , 70 <sup>-0,3</sup>	Иә	

Берілген бөлімде Дарье жел турбинасының қуыс элементтерінде табиғи желдету негізінде жылулық қорғаныс жүйесі ұсынылды. Айналымды қозғалыс кезінде центрден тепкіш күштердің себебінен турбинаның қуыс элементтерінде табиғи желдету құбылысы пайда болады. Қалақша бетінің конвективті суынуы жел жылдамдығына тікелей тәуелді болуы турбинаның жылулық қорғанысын жобалауға мүмкіндік берді.

Тәжірибелік есептеулер нәтижесіне сүйене отырып, жылулық қорғанысы бар, қуаты 1 кВт жел турбинасы және оның конструкторлық құжаттамасы жасалды, турбинаның конструкциясы технологиялық тұрғыдан талданды.

## Қорытынды

Диссертациялық жұмыста шұғыл континенталды аймақтарда жұмыс істейтін жел турбиналарын мұз басу мәселесінің техника-технологиялық шешімі табылды. Зерттеу объектісі ретінде үш қалақшалы Дарье жел турбиасы қарастырылды. Зерттеудің нәтижелері бойынша келесідей қорытындылар жасалды:

1. Алғаш рет, айналып тұрған Дарье жел турбинасындағы мұздың қатуын сандық зерттеу әдісі ұсынылды. Мұз басуды жобалаудың сандық әдісі тәжірибелік мәліметтермен валидацияланды. Валидация нәтижесі сандық әдіс пен тәжірибелік мәліметтердің жақсы үйлесімін көрсетті. Ұсынылған әдіс компьютерлік қорларды үнемдеп, жеткілікті деңгейдегі дәлдікпен мұз басуды болжау мүмкіндігіне ие.

2. Дарье жел турбинасының қалақшасын, қоршаған ортаның температурасына және желдің жылдамдығына тәуелсіз, толықтай мұз басатыны анықталды. Бұл айналып тұрған Дарье жел турбиасы қалақшаларын желдің атқылау бұрышының кең ауқымда өзгеруімен түсіндірілді. Дарье жел турбинасын мұз басқан кезде қалақшаның қалыңдығы артып, көтеру күшінің кедергі күшіне қатынасы 75% дейін төмендеп, турбинаның өнімділігі 80% дейін кемиді.

3. Мұз басқан қалақшаның қалыңдығы хорда ұзындығының 22% дейін өседі. Центрден тепкіш күштің әсерінен қалақшаның сыртқы және ішкі беттеріндегі мұздың қалыңдығы өзгеше болды. Мұз басқан қалақша симметриялы болмайды. Қалақшаның сыртқы бетіндегі мұздың қалыңдығы ішкі бетіндегі қалыңдығынан артық болады. Желдің қалақшаны атқылау бұрышының кең ауқымда өзгеруіне байланысты, тамшылардың қалақша бетінде жинақталуының орны әрдайым өзгеріп отырды.

4. Қалақшаның айналу периодының бірінші ширегінде мұз басқан жел турбинасының айналу моменті таза қалақшамен салыстырғанда 18% кемиді. Ал екінші ширекте тіпті 129% дейін кемігені анықталды. Нәтижесінде қуат өндіру коэффициенті 80% төмендейтіні анықталды.

5. Алғаш рет центрден тепкіш күштердің әсерінен болатын Дарье турбинасының қуыс элементтерінде болатын табиғи желдету құбылысы тәжірибе жүзінде зерттелді. Қалақша беті мен қоршаған орта арасындағы жылуалмасу қарқыны қуыс элементтеріндегі жылы ауа жылдамдығына тура пропорционал екені анықталды. Сәйкесінше, қуыс элементтерді жылы ауамен жылыту турбина қалақшаларын мұз басудан қорғауға мүмкіндік береді.

6. Қуаты 1кВт, жылулық қорғанысы бар жел турбиасы жобаланып, паспорты жасалды. Сонымен қатар, аталған жел турбинасының технологиялық мүмкіндігіне талдау жүргізілді.

*Алдыға қойылған міндеттердің толығымен орындалуын бағалау*

Диссертациялық жұмыста қойылған міндеттер толығымен орындалды. Үш қалақшалы Дарье жел турбинасында мұздың қатуын сандық жобалау жүргізілді.

Сандық жобалаудың нәтижелері тәжірибелік мәліметтермен валидацияланды. Дарье жел турбинасының қуыс элементтерінің табиғи желдетуі тәжірибелік зерттелді. Тәжірибелік зерттеу нәтижесінде жылулық қорғаныс әдісі ұсынылды. Жылулық қорғанысы бар жел турбинасының конструкциясы ұсынылды.

*Зерттеу нәтижелерін қолдану бойынша ұсыныстар мен алғашқы мәліметтер*

Диссертациялық жұмыста ұсынылған мәліметтер Дарье жел турбинасының мұз басуын толығымен түсініп, қоршаған ортаның түрлі жағдайлары үшін жылулық қорғаныс стратегиясын құруға және шұғыл-континенталды аймақтарда орналасқан жел турбиналарының жұмысын оңтайландыруға мүмкіндік береді:

– ауа райының қолайсыз жағдайларында жел турбиналарын одан әрі эксплуатациялау немесе уақытша тоқтату бойынша шешім қабылдау;

– жылулық қорғанысты қосу туралы шешімді қабылдау;

– қызметкерлердің қауіпсіздігі туралы шешімді қабылдау.

*Зерттеу нәтижелерінің техника-экономикалық тиімділігін бағалау*

Дарье жел турбинасында мұз басуын сандық жобалаудың берілген әдісі қымбат құрал жабдықты талап ететін тәжірибелік зерттеулердің орнына пайдаланыла алады, сонымен қатар, жел турбина қалақшасының айналмалы қозғалысы транзиттік мәселе болғандықтан, көптеген компьютерлік есептеу қуатын талап етеді, ал диссертациялық жұмыста берілген әдіс қалақшалардың айналмалы қозғалысын стационар мәселе ретінде қарастырып, есептеу қорларын үнемдеуге мүмкіндік береді.

Қуыс элементтердің табиғи желдетуі негізінде ұсынылған жылулық қорғаныстың әдісі жел турбинасының өзіндік құнын арттырмайды және аэродинамикалық параметрлерін де өзгертпейді. Боранды күні турбинаның өнімділігі артады себебі басқа турбиналар тоқтап тұруға мәжбүр болған кезде жылулық қорғанысы бар турбина одан әрі энергия өндіруге қабілетті.

*Диссертациялық жұмыстың ғылыми деңгейін бағалау*

Диссертациялық жұмыс әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың физика-техникалық факультеті, жылуфизикасы және техникалық физика кафедрасында, София техникалық университетінің Пловдив филиалы, механика кафедрасында, Данияның техникалық университеті, жел энергиясы факультеті, сұйықтар динамикасы кафедрасында орындалды. Диссертациялық жұмыста ұсынылған сандық әдіс тәжірибелік нәтижелермен салыстырылып, расталды. Диссертациялық жұмыс нәтижелері халықаралық беделді ғылыми журналдарда жарияланып, конференцияларда талқыланды.

## Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

- 1 S. Diyar, A. Akparova, A. Toktabayev, M. Tyutunnikova, Green Economy – Innovation-based Development of Kazakhstan // Procedia - Soc. Behav. Sci. – 2014. – Vol.140. – P. 695-699. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2014.04.497>.
- 2 IEA. Renewables 2022 // IEA. Paris. – 2022. –P. 17-20.
- 3 O. Parent, A. Ilinca, Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review, // Cold Reg. Sci. Technol. – 2011. – Vol.65. – P. 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005>.
- 4 IRENA, Renewable Energy Statistics 2019 // IRENA. Abu Dhabi. , 2019.
- 5 GWEC, Global wind energy council report 2018 // Wind Glob. Counc. Energy. – 2019. P. 1-61.
- 6 J. Lee, F. Zhao, Global Wind Energy Report // GWEC. Brussels – 2021. – P.23-31
- 7 REN 21 Renewables Now, Renewables Global Status Report// Paris – 2019, –P. 38-58.
- 8 L. Battisti, M. Ricci, Green Energy and Technology Wind Energy Exploitation in Urban Environment. - Trento: Springer, 2017. - P.235.
- 9 GWEC, Global Wind Report annual market update // Wind Energy Technol. Brussels – 2015. – P.64-73.
- 10 REN 21 Renewables Now, Renewables Global Status Report // Galvanotechnik –2019. – P.196.
- 11 World Energy Statistics // Paris. – 2018. – P.165. [https://doi.org/10.1787/world\\_energy\\_stats-2018-en](https://doi.org/10.1787/world_energy_stats-2018-en).
- 12 McKinsey Global Institute, Global Energy Perspective // – 2019. – P.96
- 13 IEA, World Energy Outlook // Paris, – 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- 14 IEA, Oil market report // Paris, – 2022. <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-august-2022>.
- 15 IEA, Gas market report // Paris, – 2022. <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q3-2022>.
- 16 World Energy Outlook // OECD, – 2018. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.
- 17 V. Vorotnikov, The changing Russian oil market // World Pumps. – 2013. – P.29-32. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(13\)70212-8](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(13)70212-8).
- 18 D. Yuan, S. Li, R. Li, F. Zhang, Economic policy uncertainty, oil and stock markets in BRIC: Evidence from quantiles analysis, // Energy Econ. – 2022. – Vol.110. –P.847-861. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2022.105972>.
- 19 IAEA annual report // IAEA. – 2020. <https://www.iaea.org/opic/annual-report-2020>.
- 20 Nuclear technology review // IAEA. – 2021. <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-inf2.pdf>.
- 21 G. Gozgor, M.K. Mahalik, E. Demir, H. Padhan, The impact of economic globalization on renewable energy in the OECD countries // Energy Policy. –

2020. –Vol.139. –P.1113-1165. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111365>.
- 22 M.I. ul Husnain, N. Nasrullah, M.A. Khan, S. Banerjee, Scrutiny of income related drivers of energy poverty: A global perspective // *Energy Policy*. – 2021. –Vol.157. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112517>.
- 23 X.D. Wu, J.L. Guo, X. Ji, G.Q. Chen, Energy use in world economy from household-consumption-based perspective // *Energy Policy*. –2019. –Vol.127. – P.287-298. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.12.005>.
- 24 IRENA, Renewable Energy Statistics // Paris. – 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>.
- 25 IRENA, Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Trade Outlook for 2050 and Way Forward // Paris. – 2021. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Global\\_hydrogen\\_trade\\_part\\_1\\_2022\\_.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf).
- 26 IEA, Hydropower // Paris. – 2021. <https://www.iea.org/reports/hydropower>.
- 27 N. Skordoulis, E.I. Koytsoumpa, S. Karellas, Techno-economic evaluation of medium scale power to hydrogen to combined heat and power generation systems // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. –Vol.47. –P.26871–26890. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.06.057>.
- 28 Y.L. He, K. Wang, Y. Qiu, B.C. Du, Q. Liang, S. Du, Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions // *Appl. Therm. Eng.* –2019. –Vol.149. – P.448–474. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.12.006>.
- 29 Y. Lei, X. Lu, M. Shi, L. Wang, H. Lv, S. Chen, C. Hu, Q. Yu, S.D.H. da Silveira, SWOT analysis for the development of photovoltaic solar power in Africa in comparison with China // *Environ. Impact Assess. Rev.* – 2019. –Vol.77. –P.122–127. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.04.005>.
- 30 J. Qin, E. Hu, X. Li, Solar aided power generation: A review// *Energy Built Environ.* – 2020. –Vol.1. – P.11–26. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2019.09.003>.
- 31 M.D. Esteban, J.J. Diez, J.S. López, V. Negro, Why offshore wind energy? // *Renew. Energy*. – 2011. – Vol.36. –P.444–450. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.07.009>.
- 32 A.M. Foley, P.G. Leahy, A. Marvuglia, E.J. McKeogh, Current methods and advances in forecasting of wind power generation // *Renew. Energy*. –2012. – Vol.37 –P.1–8. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.05.033>.
- 33 WWEA, New wind installations report // Washington. – 2020. <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>.
- 34 UN, Global renewable energy investment // Bruxelles. – 2019.
- 35 U.S. Department of Energy, 2018 Wind Technologies Market Report // Washington. –2018. –P.1–98.
- 36 KAZENERGY, The National Energy Report // Nur-Sultan. – 2019.

- <http://www.kazenergy.com/en/analyst/783/>.
- 37 IEA, Energy sector review. Kazakhstan // Paris. – 2022. <https://www.iea.org/reports/kazakhstan-2022>.
- 38 A. Boute, Regulatory stability and renewable energy investment: The case of Kazakhstan // Renew. Sustain. Energy Rev. –2020. –Vol.121. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109673>.
- 39 O. Parent, A. Ilinca, Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review // Cold Reg. Sci. Technol. –2011. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005>.
- 40 C. Hochart, G. Fortin, J. Perron, A. Ilinca, Wind turbine performance under icing conditions // Wind Energy. –2008. –Vol.11. –P.319–333. <https://doi.org/10.1002/we.258>.
- 41 S. Bhuyan, A. Biswas, Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors// Energy Convers. Manag. –2014. –Vol.87. –P.859–867. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.07.056>.
- 42 J.Y. Jin, M.S. Virk, Study of ice accretion and icing effects on aerodynamic characteristics of DU96 wind turbine blade profile// Cold Reg. Sci. Technol. – 2019. –Vol.160. –P.119–127. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01.011>.
- 43 Y. Li, K. Tagawa, F. Feng, Q. Li, Q. He, A wind tunnel experimental study of icing on wind turbine blade airfoil // Energy Convers. Manag. –2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.026>.
- 44 Y. Li, S. Wang, Q. Liu, F. Feng, K. Tagawa, Characteristics of ice accretions on blade of the straight-bladed vertical axis wind turbine rotating at low tip speed ratio // Cold Reg. Sci. Technol. –2018. –Vol.145. –P.1–13. <https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2017.09.001>.
- 45 F. Villalpando, M. Reggio, A. Ilinca, Numerical study of flow around iced wind turbine airfoil // Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. –2012. –Vol.6. –P.39–45. <https://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015401>.
- 46 A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine // Appl. Energy. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>.
- 47 A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment // Renew. Energy. –2017. –Vol.107. –P.373–385. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.006>.
- 48 A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters // Energy Convers. Manag. –2018. –Vol.169. –P.45–77. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.042>.
- 49 Y. Li, Q. Liu, S. Wang, F. Feng, T. Kotaro, Wind tunnel test and numerical simulation on blade icing of small-scaled vertical axis wind turbine // Kongqi Donglixue Xuebao/Acta Aerodyn. –2016. [96](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-</a></p></div><div data-bbox=)



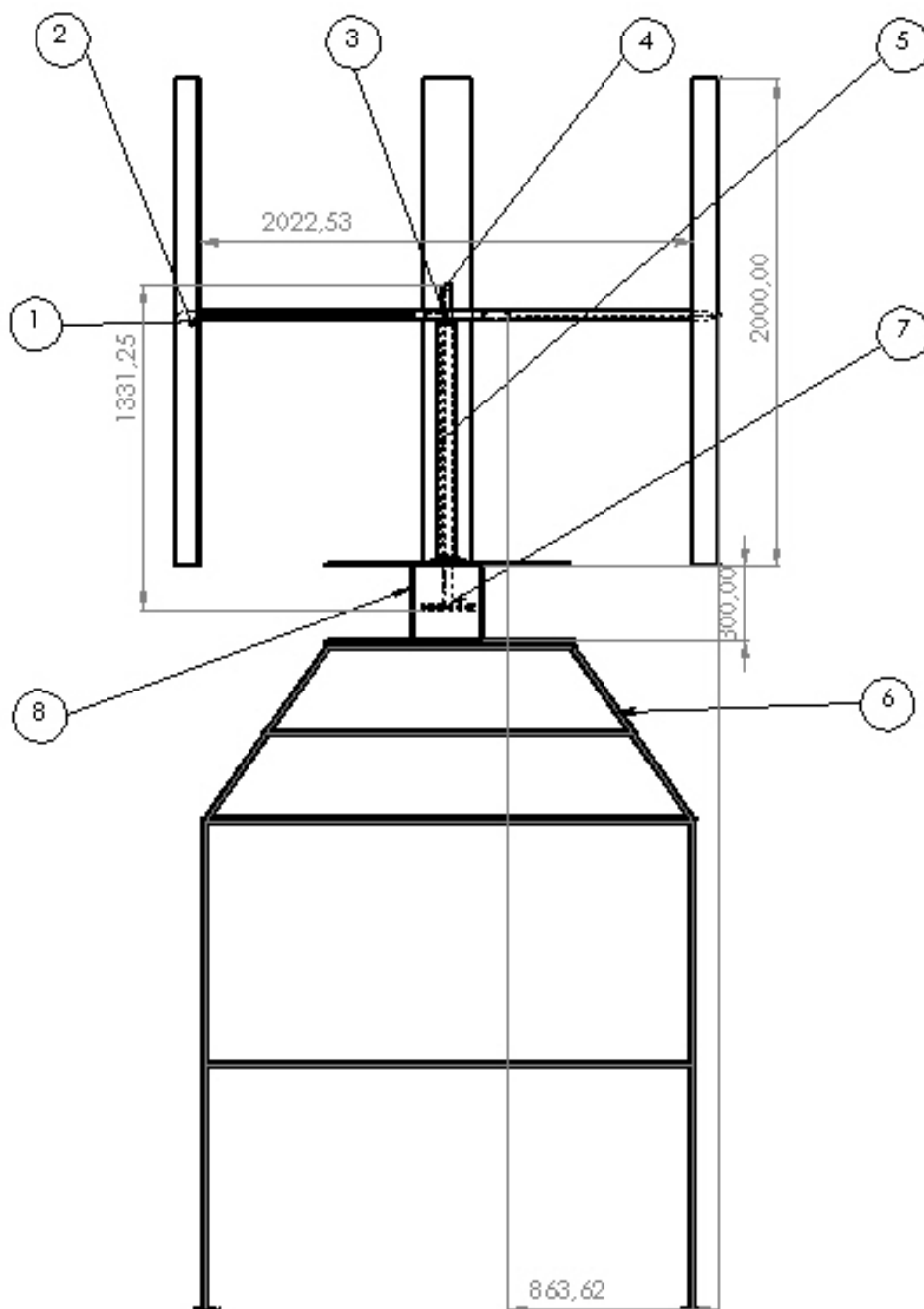
- 2015.0214.
- 50 G. Fortin, J. Perron, Wind turbine Icing and de-icing // in: 47th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo., – 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-274>.
  - 51 F. Feng, S. Li, Y. Li, W. Tian, Numerical simulation on the aerodynamic effects of blade icing on small scale Straight-bladed VAWT // Phys. Procedia. –2012. – Vol.24. –P.774–780. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2012.02.115>.
  - 52 D.N. Anderson, J.-C. Tsao, Overview of Icing Physics Relevant to Scaling // – 2005. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2130>.
  - 53 M.S. Aubé, G.S. Baruzzi, W.G. Habashi, C.N. Aliaga, Application of FENSAP-ICE-unsteady to helicopter icing // SAE Tech. Pap. –2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3310>.
  - 54 A. Laneville, P. Vittecoq, Dynamic stall: The case of the vertical axis wind turbine // J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME. –1986. <https://doi.org/10.1115/1.3268081>.
  - 55 F. Scheurich, T.M. Fletcher, R.E. Brown, Simulating the aerodynamic performance and wake dynamics of a vertical-axis wind turbine // Wind Energy. –2011. –14. <https://doi.org/10.1002/we.409>.
  - 56 C. Xi, Z. Qi-Jun, Numerical simulations for ice accretion on rotors using new three-dimensional icing model // in: J. Aircr., – 2017. <https://doi.org/10.2514/1.C033986>.
  - 57 N. Franchina, G. Persico, M. Savini, 2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations// Renew. Energy. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.086>.
  - 58 M. Etemaddar, M.O.L. Hansen, T. Moan, Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions // Wind Energy. –2014. <https://doi.org/10.1002/we.1573>.
  - 59 А.К. Ершина, Ш.А. Ершин, У.К. Жапбасбаев, Основы теории ветротурбины Дарье // КазГосИнТи. – Алматы:2001.
  - 60 A. Zanon, M. De Gennaro, H. Kühnelt, Wind energy harnessing of the NREL 5 MW reference wind turbine in icing conditions under different operational strategies // Renew. Energy. –2018. –Vol.115. –P.760–772. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.08.076>.
  - 61 F. Balduzzi, A. Bianchini, G. Ferrara, L. Ferrari, Dimensionless numbers for the assessment of mesh and timestep requirements in CFD simulations of Darrieus wind turbines // Energy. –2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.111>.
  - 62 A. Bianchini, F. Balduzzi, P. Bachant, G. Ferrara, L. Ferrari, Effectiveness of two-dimensional CFD simulations for Darrieus VAWTs: a combined numerical and experimental assessment // Energy Convers. Manag. –2017. –Vol.136. – P.318–328. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.01.026>.
  - 63 M.M. Elsakka, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, CFD analysis of the angle of attack for a vertical axis wind turbine blade // Energy Convers. Manag. –2019. –Vol.182. –P.154–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.054>.

- 64 M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, A. Sedaghat, A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines // *Energy Convers. Manag.* – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.016>.
- 65 G. Croce, E. De Candido, W.G. Habashi, J. Munzar, M.S. Aubé, G.S. Baruzzi, C. Aliaga, FENSAP-ICE: Analytical model for spatial and temporal evolution of in-flight icing roughness // *J. Aircr.* – 2010. <https://doi.org/10.2514/1.47143>.
- 66 FENSAP-ICE, ANSYS FENSAP-ICE User Manual // – 2017.
- 67 F. Balduzzi, A. Bianchini, R. Maleci, G. Ferrara, L. Ferrari, Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines// *Renew. Energy.* –2016. –Vol.85. – P.419–435. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>.
- 68 G.-L. Lei, W. Dong, M. Zheng, Z.-Q. Guo, Y.-Z. Liu, Numerical investigation on heat transfer and melting process of ice with different porosities // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2017. –Vol.107. –P.934–944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.004>.
- 69 C. Son, T. Kim, Development of an icing simulation code for rotating wind turbines// *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* –2020. –Vol.203. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104239>.
- 70 ANSYS FLUENT 13 User’s Guide, Ansys Fluent Theory Guide // ANSYS Inc., USA. –2013. –P.724–746.
- 71 H. Beaugendre, F. Morency, W.G. Habashi, FENSAP-ICE’s three-dimensional in-flight ice accretion module: ICE3D // *J. Aircr.* –2003. <https://doi.org/10.2514/2.3113>.
- 72 H. Beaugendre, F. Morency, W.G. Habashi, FENSAP-ICE: Roughness effects on ice shape prediction, in: 41st Aerosp. Sci. Meet. Exhib., 2003. <https://doi.org/10.2514/6.2003-1222>.
- 73 N. Gregory, C.L. O’Reilly, Low-Speed Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 Aerofoil Section, including the Effects of Upper-Surface Roughness Simulating Hoar Frost // *Reports Memo.* – 1970.
- 74 C.L. Ladson, A.S. Hill, High Reynolds Number Transonic Tests of an NACA 0012 Airfoil in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel // *NASA Tech. Memo.* – 1987.
- 75 J. Shin, T.H. Bond, Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil // 5th Symp. Numer. Phys. Asp. Aerodyn. Flows. –1992. –P.0–11.
- 76 W.B. Wright, Validation results for LEWICE 3.0 // 43rd AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib. - Meet. Pap. – 2005. –P.15109–15134. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1243>.
- 77 J.Y. Jin, M.S. Virk, Experimental study of ice accretion on S826 & S832 wind turbine blade profiles // *Cold Reg. Sci. Technol.* –2020. –Vol.169.
- 78 M. Drela, Xfoil: Subsonic Airfoil Development System // MIT. – 2013.
- 79 J. Morgado, R. Vizinho, M.A.R. Silvestre, J.C. Páscoa, XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils // *Aerosp. Sci. Technol.* –2016. –Vol.52. –P.207–214.

- <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.02.031>.
- 80 R. Manatbayev, Z. Baizhuma, S. Bolegenova, A. Georgiev, Numerical simulations on static Vertical Axis Wind Turbine blade icing // *Renew. Energy*. –2012. –Vol.170. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.023>.
- 81 Y. Wang, S. Shen, G. Li, D. Huang, Z. Zheng, Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine with different series airfoil shapes // *Renew. Energy*. –2018. –Vol.126. –P.801–818. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.095>.
- 82 Z. Baizhuma, T. Kim, C. Son, Numerical method to predict ice accretion shapes and performance penalties for rotating vertical axis wind turbines under icing conditions// *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* –2021. –Vol.216. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104708>.
- 83 A. Fluent, *Ansys Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc., USA. – 2013.
- 84 G. Bedon, S. De Betta, E. Benini, A computational assessment of the aerodynamic performance of a tilted Darrieus wind turbine// *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* –2015. –Vol.145. –P.263–269. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2015.07.005>.
- 85 H. Day, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Adjoint based optimisation for efficient VAWT blade aerodynamics using CFD // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* – 2021. –Vol.208. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2020.104431>.
- 86 Z. Ni, M. Dhanak, T. chow Su, Improved performance of a slotted blade using a novel slot design // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* –2019. –Vol.189. –P.34–44. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2019.03.018>.
- 87 Y. Yan, E. Avital, J. Williams, J. Cui, Aerodynamic performance improvements of a vertical axis wind turbine by leading-edge protuberance // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* –2021. –Vol.211. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2021.104535>.
- 88 Q. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance) // *Energy*. –2016. –Vol.106. –P.443–452. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.03.089>.
- 89 T. Reinert, R.J. Flemming, R. Narducci, R.J. Aubert, Oscillating airfoil icing tests in the NASA glenn research center icing research tunnel // *SAE Tech. Pap.* с 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-38-0016>.
- 90 Патент 2447318С2 РФ. Способ тепловой защиты ветроэнергетической установки карусельного типа и конструктивное оформление (варианты) для его осуществления / Ершина, А.К., Ершин, Ш.А., Манатбаев, Р.К., опубли. 10.04.2012.
- 91 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.- М.: Наука, 1969.
- 92 Р.К. Манатбаев, Е.И. Имангалиев, А.Е. Турсынбаева, Методика расчета расхода теплового воздуха через стенку лопастей работающего агрегата // *Вестник НИА*. –2016. –№4. –С.43–48.
- 93 Р.К. Манатбаев, Е.И. Имангалиев, А.А. Куйкабаева, Э.М. Зулбухарова,

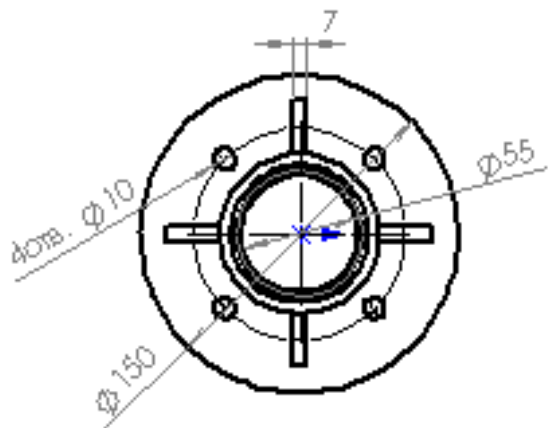
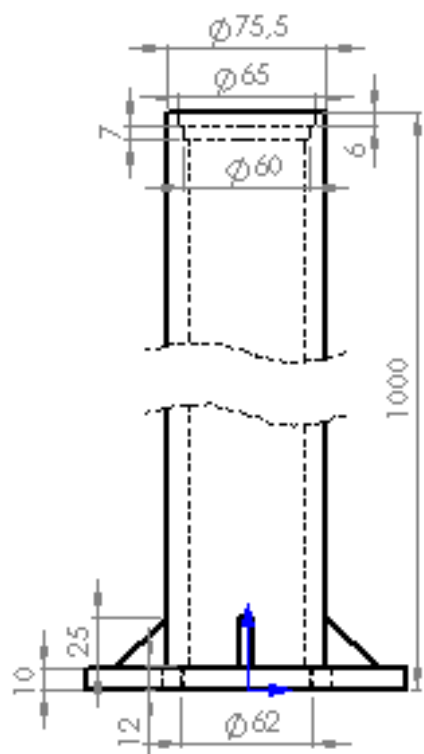
- Расчет основных параметров конструкторских характеристик ротора с системой антиобледенения // Вестник НИА. –2016. –№1. –С.70–74.
- 94 R.K. Manatbayev, O. Dauylbaev, B.T. Elubaeva, L.A. Sadikova, A.T. Tulegenova, Tulegenova A.T. Theoretical basis of natural ventilation inside Darrieus // Int. J. Math. Phys. –2012. –Vol.3. –P.59–61.
- 95 R.K. Manatbayev, O. Dauylbaev, B.T. Elubaeva, L.A. Sadikova, A.T. Tulegenova, Theoretical basis of natural ventilation inside Darrieus // Int. J. Math. Phys. –2012. –Vol.3. –P.59–61.
- 96 Патент 22192 РК. Е. Аскарров, Ветровая энергоустановка с вертикальной осью вращения ветроколеса, –2010.

## А ҚОСЫМША. Жел энергетикалық қондырғының құрылысы

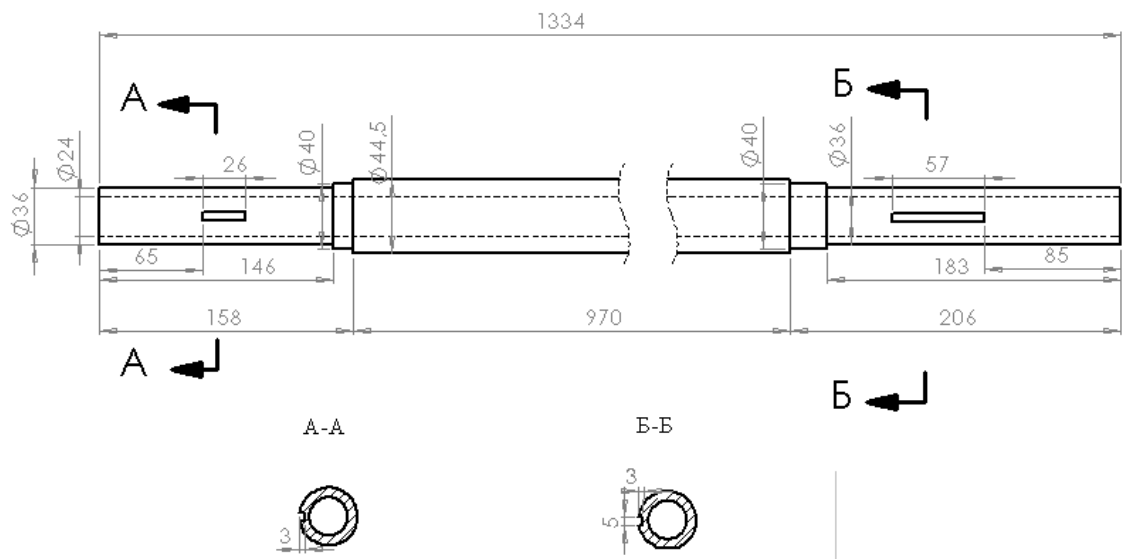


А.1-сурет. Қондырғының жалпы түрі

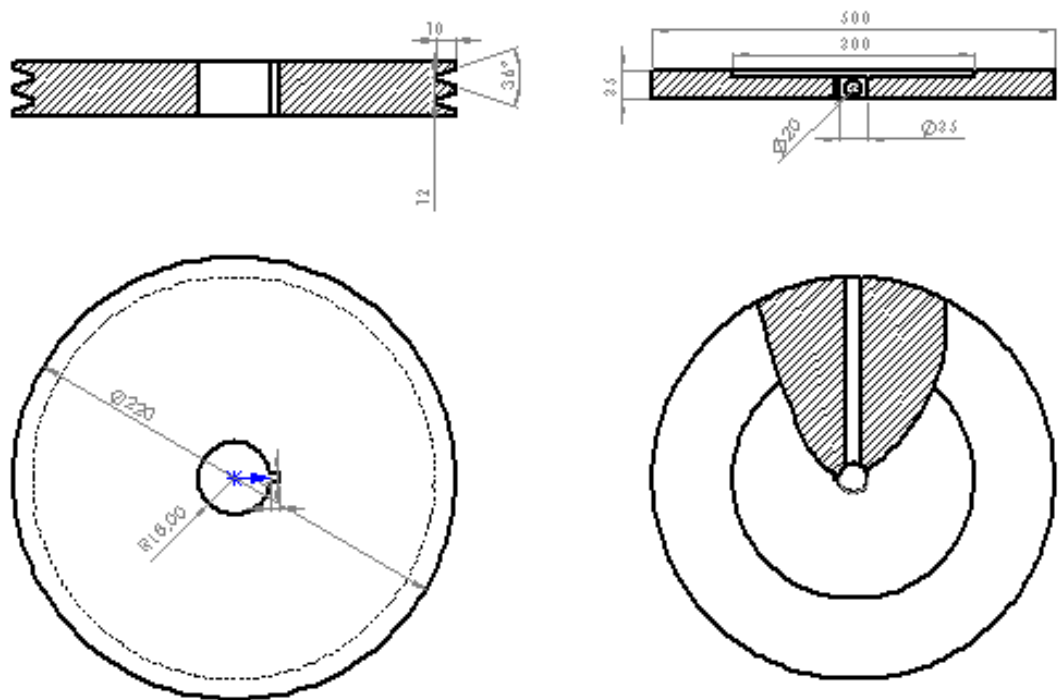
1 – қалақша; 2 – серпер; 3 – бекіткіш; 4 – айналу білігі; 5 – бекіткіш корпус;  
6 – орнату платформасы; 7 – шығыр; 8 – сыртқы корпус



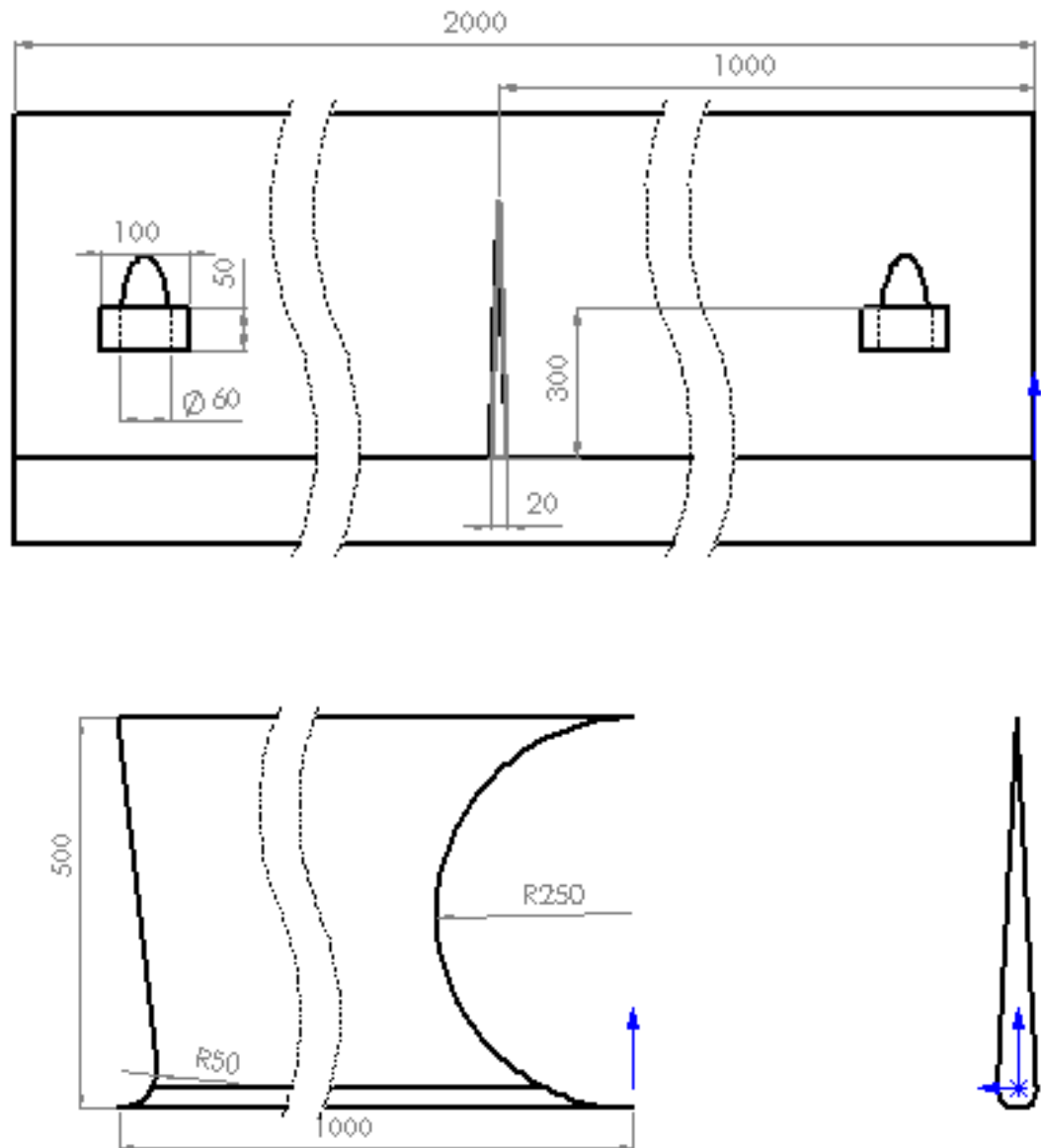
А.2-сурет. Жел энергетикалық қондырғының корпусы



А.3-сурет. Жел турбиасының айналу осі



А.4-сурет. Жел турбиасының шкиві



А.5-сурет. Жел энергетикалық қондырғының қалақшасы мен серпері