«Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті»

ӘОЖ 533.6.011:536.24 Қолжазба құқығында

ТЛЕУБЕРГЕНОВА АҚМАРАЛ ЖАРЫЛХАСЫНҚЫЗЫ

Жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына ауа ағынының жылу физикалық параметрлерінің әсерін зерттеу

8D05303-Жылуфизика және теориялық жылутехника

Философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену үшін ұсынылған диссертация

Ғылыми кеңесшілер
техника ғылымдарының кандидаты,
профессор
Шаймерденова К.М.

PhD доктор,
профессор
Танашева Н.К.

физика-математика ғылымдарының докторы,
профессор
Миньков Л.Л.

Қазақстан Республикасы
Қарағанды, 2025

МАЗМҰНЫ

АНЫҚТАМАЛАР, КӨРСЕТКІШТЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР..... 4
КІРІСПЕ..... 5
1 КӨЛДЕНЕҢ ЖӘНЕ ТІК АЙНАЛУ ОСІ БАР ӘРТҮРЛІ ГЕОМЕТРИЯЛАРЫ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРДЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫ..... 9
1.1 Зерттелетін тақырыптың өзектілігі..... 9
1.2 Айналмалы цилиндрлер түріндегі қалақшаның аэродинамикасы..... 14
1.3 Магнус эффектісіне негізделген жел қондырғылары..... 20
1.4 Жел энергетикалық қондырғыны модельдеу әдістері..... 23
1.5 Зерттеудің мақсаты мен міндеттерінің қойылымы..... 24
1.6 Бөлім бойынша қорытынды..... 24
2 КӨЛДЕНЕҢ АЙНАЛУ ОСІ БАР ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ..... 25
2.1 Қалақшаның геометриялық пішінінің оңтайлы нұсқасын таңдау..... 25
2.2 Шекаралық шарттар..... 33
2.3 Қалақшаны математикалық модельдеу нәтижелері..... 35
2.4 Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының үш өлшемді моделін құру..... 42
2.5 Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының үш өлшемді моделін құру..... 50
2.6 Көлденең айналу осіне арналған жел энергетикалық қондырғыларының аэродинамикалық сипаттамаларын математикалық есептеу..... 56
2.7 Бөлім бойынша қорытынды..... 60
3 ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛЫ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖЕЛ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ТӘЖІРИБЕЛІК СТЕНДІ ЖӘНЕ ӨЛШЕУ ӘДІСТЕМЕСІ..... 61
3.1 Әрекет етуші күштерді өлшеу әдістемесі..... 61
3.2 Құрамалы қалақшаның тәжірибелік үлгісі мен аэродинамикалық сипаттамасын талдау..... 67
3.3 Екі-үш қалақшалы жел қондырғысының зертханалық модельдерін сипаттау және зерттеу нәтижесін талдау..... 74
3.4 Бөлім бойынша қорытынды..... 82
4 ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ..... 83
4.1. Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау..... 83
4.2. Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғының аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау..... 87

4.3.Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау..... 90
4.4 Бөлім бойынша қорытынды..... 93
5 ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫНА АУА АҒЫНЫНЫҢ ЖЫЛУ ФИЗИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ..... 94
5.1 Жел энергетикалық қондырғысын орай ағу кезіндегі ауа ағыны қысымының өзгеруін анықтау..... 94
5.2 Зерттеу нәтижелері мен салыстырмалы талдау..... 96
5.3 Бөлім бойынша қорытынды..... 100
6. КӨЛДЕНЕҢ АЙНАЛУ ОСІ БАР ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫН СЫНАУ НӘТИЖЕЛЕРІ..... 101
6.1 Құрамалы қалақшалары бар жел қондырғысының тәжірибелік үлгісін әзірлеу және құрастыру..... 101
6.2 Көлденең айналу осі бар жел энергетикалық қондырғысна арналған электр генераторы..... 104
6.3 Көлденең бағыттағы құрамалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық және электрфизикалық параметрлерін зерттеу нәтижелері..... 106
6.4 Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең бағытта айналатын құрамалы желэнергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісін сынау және жылуфизикалық параметрін анықтау..... 110
6.5 Бөлім бойынша қорытынды..... 115
ҚОРЫТЫНДЫ..... 116
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ..... 118
ҚОСЫМША А..... 128
ҚОСЫМША Ә..... 129
ҚОСЫМША Б..... 130
ҚОСЫМША В..... 131
ҚОСЫМША Г..... 132
ҚОСЫМША Ғ..... 133
ҚОСЫМША Д..... 134
ҚОСЫМША Е..... 135

АНЫҚТАМАЛАР, КӨРСЕТКІШТЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

Осы диссертацияда келесі терминдер тиісті анықтамаларымен қолданылды:

Аэродинамикалық құбыр – әртүрлі модельдегі қатты денелердің орай ағуын зерттейтін берілген параметрдегі газ немесе ауа ағынын тудыратын зертханалық қондырғы.

АҚ – аэродинамикалық құбыр
ЖЭК – жаңартылатын энергия көздері
ЖД – жел доңғалағы
ЖЭС – жел электр станциясы
ЖЭҚ – жел энергетикалық қондырғысы
ЖЭПК (ξ) – жел энергиясының пайдалану коэффициенті
C_y – көтеру коэффициенті
C_x – маңдайлық кедергі коэффициенті
$F_{м.к}$ – маңдайлық кедергі күші
$F_{к.к}$ – көтеру күші
d – цилиндр диаметрі, м
u_∞ – ағын жүгірісінің жылдамдығы, м/с
$\overline{p}$ – қысым коэффициенті
$P_{ст}$ – статикалық қысым, Па
h – қысымдағы манометр көрсеткіші
K – манометр еңкіштігінің коэффициенті
ε – цилиндр бетінің алдыңғы критикалық нүктесінен есептелетін бұрыш, градуспен
β – аэродинамикалық құбырдың құлама коэффициенті
S – Мидель қимасының ауданы, $м^2$
μ – газдың динамикалық тұтқырлығы, кг/м·с
ϑ – газдың кинематикалық тұтқырлығы, $м^2/с$
L – айналым ағысы аймағының ұзындығы, м
u_{0x} – цилиндрдің алдыңғы критикалық сызығы бойындағы жылдамдық, м/с
ℓ – дененің орталық цилиндрлік бөлігінің ұзындығы, м
ℓ/d – цилиндрдің салыстырмалы ұзындығы
ξ – түзету коэффициент
Re – Рейнольдс саны
Sh – Струхаль саны
f – құйындардың бұзылу жиілігі, Гц
δ – цилиндр қабырғасының қалыңдығы, м

КІРІСПЕ

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Әлемдегі баламалы энергия көздері әрқашан адамзатты, әсіресе соңғы уақытта қызықтырып келеді. Аймақтарды электр энергиясымен қамтамасыз етуден басқа, жаңартылатын энергия көздерін дамыту отын-энергетикалық ресурстарды үнемдеу және қоршаған ортаға теріс әсерді азайту үшін қажет.

Соның ішінде, жел энергиясы – ең қарқынды дамып келе жатқан жаңартылатын энергия көздерінің бірі. Бірқатар бастамалардың негізінде ел Үкіметі 2015-2030 жылдар аралығында Ұлттық жел энергетикасын дамытудың қажетті іс-шаралары мен нысаналы көрсеткіштерін айқындады, оған сәйкес 2030 жылға қарай жалпы қуаты 2000 МВт-қа дейінгі жел қондырғыларын салу көзделеді.

Жел энергиясының көптеген артықшылықтары бар, бұл оның әлемдегі ең жылдам дамып келе жатқан энергия көздерінің бірі екенін түсіндіреді. Жел энергетикасының мүмкіндіктері мен қоғамдық игіліктерді одан әрі кеңейту үшін зерттеушілер декарбонизацияланған электр энергиясының болашағын қолдау үшін техникалық және әлеуметтік-экономикалық мәселелерді шешу үшін жұмыс істеуде.

Бүгінгі таңда жел энергетикасы міндеттерінің бірі жел жылдамдығының төмен мәндерінде де тиімді жұмыс істей алатын жел қозғалтқышын жасау болып табылады.

Қазақстан аумағының басым бөлігі үшін желдің орташа жылдық жылдамдығы 6 м/с-тан аз жел электр қондырғыларын (ЖЭҚ) әзірлеу және құру үшін желдің политропты раушанымен ауа ағыны жылдамдығының жиі өзгеруі кезінде ЖЭК энергия тиімділігін олардың төмен құны мен шағын массогабаритті өлшемдерімен қоса қамтамасыз ете алатын жаңа техникалық шешімдерді іздеу талап етіледі.

Диссертациялық жұмыстың өзектілігі. Диссертациялық жұмыста ұсынылған желдің төмен жылдамдығында жұмыс істейтін құрамалы қалақшалары бар жел қондырғысын әзірлеу, аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу өзекті болып табылады. Яғни, осы зерттеу жұмысы бойынша әзірленген желдің төмен жылдамдығында жұмыс істейтін көлденең осьті жел қондырғысының бірқатар артықшылықтары бар: төмен жылдамдықта энергия өндіруді бастай алады, оларды көптеген орындарда орнатуға болады, дәстүрлі көлденең жел генераторларымен салыстырғанда, олардың көпшілігі әлдеқайда тыныш және діріл аз жұмыс істейді, бұл оларды тұрғын аймақтарға жақын жерде орнату үшін неғұрлым қолайлы етеді. Желдің төмен жылдамдығында жұмыс істеу қабілеті оларды жел энергетикасының жалпы әлеуетін ұлғайта отырып, неғұрлым ірі генераторлар тиімсіз аудандарда орнатуға мүмкіндік береді. Ал жалпы кейбір модельдер, әсіресе қуаттылығы аз, қарапайым конструкцияға ие, оңай монтаждалады және ең аз қызмет көрсетуді талап етеді, бұл пайдалану шығындарын азайтады.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына ауа ағынының жылу физикалық параметрлерінің әсерін зерттеу болып табылады.

Осы мақсатқа сәйкес келесі ***міндеттер*** қойылды:

1. Қалақшалардың әртүрлі геометриясы және айналу осінің әртүрлі бағдары бар жел энергетикалық қондырғылардың аэродинамикасын зерттеуге аналитикалық шолу.

2. Ansys Fluent бағдарламалық қамтамасыз етуін пайдалана отырып, құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғының аэродинамикасын сандық модельдеу.

3. Құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының зертханалық макетін жобалау (әзірлеу) және жасау.

4. Әртүрлі орай ағу жағдайында құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғының зертханалық макетінің аэродинамикалық сипаттамаларына тестілік өлшеулер жүргізу.

5. Құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының моделінің аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу бойынша сандық есептеулер мен эксперименттік деректердің нәтижелерін салыстырмалы талдау.

6. Ауа ағынының жылуфизикалық параметрлерінің жел энергетикалық қондырғының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына әсерін зерттеу.

Зерттеу нысаны – Көлденең айналатын осьті құрамалы жел энергетикалық қондырғысының зертханалық макетінің аэродинамикасы.

Зерттеу әдіснамасы. Аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігіндегі ауа ағынының жылдамдығы мен шабуыл бұрышының өзгеруі кезінде жел энергетикалық қондырғы макетінің көтеру күшінің, маңдайлық кедергі күшінің және тарту күшінің мәндерін өлшеуге мүмкіндік беретін эксперименттік зерттеулер. ANSYS FLUENT бағдарламалық қамтамасыз етуін пайдалана отырып, жел энергетикалық қондырғының құрама қалақтарының аэродинамикасын сандық модельдеу.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы:

- Алғаш рет Ansys Fluent бағдарламасы арқылы қозғалмайтын және айналмалы цилиндрден тұратын құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының математикалық моделі алынды және оның тәжірибелік үлгісі жасалды. Жел энергетикалық қондырғысы 3 м/с жел жылдамдығынан бастап жұмыс істей бастайды.

- Қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градус орналасқанда оңтайлы жел энергетикалық қондырғысының тарту күшінің шамасы 2.9 Н мәнге ие болды. Үш қалақшалы жел қондырғысының тарту күші екі қалақшалыға қарағанда жоғары болатыны белгілі болды. Құрамалы қалақшаның аэродинамикалық күштерінің мәндері анықталды: көтеру күші 3,55 Н және маңдайлық кедергі күші 6,25 Н.

- Цилиндрдің айналу саны N=637 айн/мин кезінде 1 мм биіктегі қысымның мәні P=0,22 Па, ал 7 мм биіктікте P=0,44 Па. Демек, ауа ағыны цилиндрдің үстінен орай аққанда қысым минималды мәнде болатыны айқындалды.

- Жел қондырғысының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына ауа ағынының t, μ, ν, λ, Ср сияқты жылу физикалық параметрлерінің әсерін зерттеу барысында, олардың мәндерінің өсуімен жел қондырғысының тарту күшінің артатыны анықталды.

- Электр генераторы жел қондырғысында диаметрі 150 мм цилиндрлерді пайдаланғанда және олардың айналуы 300 айн/мин жиілікпен басталады, цилиндрлердің ұзындығы 0,69 м және жел доңғалағының диаметрі 1,2 м құрайды, электр генераторы желдің жылдамдығы 3 м/с, айналу жилігі 50 айн/мин болған кезде электр энергиясын өндіре бастады.

Қорғауға ұсынылған негізгі қағидаттар:

1. Математикалық модельдеу барысында қозғалмайтын қалақшаның бағдарлау бұрышының ($0^o \leq \alpha \leq 60^o$) өзгеру диапазонында ауа ағынының жылдамдығы 3 м/с-тан 15 м/с-қа дейін болғанда құрамалы қалақша 30 градус бұрыш кезінде маңдайлық кедергінің 7 % азаюын қамтамасыз етеді, бұл көтеру күшінің ұлғаюына байланысты.

2. Рейнольдс сандарының $1 \cdot 10^4$-нен $5 \cdot 10^4$ дейін интервалында қондырғының жел доңғалағын орай ағуы кезіндегі турбуленттілік режимде жылдамдық пен қысым өрістерінің қалыптасуы маңдайлық кедергі коэффициентінің 0,20-дан 0,26-ға дейінгі оңтайлы мәндеріне қол жеткізуге және көтеру күші коэффициентінің 0,41-тан 0,14-ге дейін өзгеруіне әкелді.

3. Жел энергетикалық қондырғының тәжірибелік үлгісінің әзірленген мониторинг жүйесін тестілеу 30 градус бағдарлау бұрышы бар қозғалмайтын қалақшаны пайдаланудың ауа температурасы -25°С дан +25°С дейінгі диапазонында өзгеруі кезінде тарту күші 1.8 есеге дейін артты.

Жұмыстың мемлекеттік ғылыми бағдарламалар жоспарымен байланысы. AP23483857 «Қалақтардың күрделі геометриялық пішінін жел энергетикасы қондырғысының тәжірибелі үлгісін жаңа конструкциясын әзірлеу және құру».

Жұмыстың практикалық құндылығы жоғары тиімділікке ие, өз осьтерінің айналасында айналатын цилиндрлер мен цилиндрлердің осіне қатысты қозғалмайтын қалақшалардан тұратын, көлденең бағытта айналатын құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысын әзірлеумен тұжырымдалады. Құрамалы қалақшалы ЖЭҚ-та алынған эксперименттік зерттеулердің нәтижелері энергиямен жабдықтаудың орталықтандырылған жүйелерінен қашықтағы тұтынушылар мен нысандарды энергиямен жабдықтау үшін ЖЭҚ-тың нақты моделін әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Жұмыста алынған нәтижелердің негізділігі мен сенімділік дәрежесі. жинақталған және қайталанатын эксперименттік деректердің жеткілікті үлкен көлемімен, конференциялардағы негізгі нәтижелерді апробациялаумен, жарияланған ғылыми мақалалармен және енгізу актісімен расталады.

Жұмыс нәтижелерінің апробациясы. Диссертацияның негізгі нәтижелері талқыланып және баяндалды: Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции Развития Сборник статей XV Международной научно-практической конференции (Петрозаводск, 8 ноября 2021 г.), «Бейсызық жүйелердегі хаос және құрылымдар Теория және тәжірибе» 12-ші

Халықаралық ғылыми конференциясының материалдарында (Павлодар, 17-19 маусым 2022 ж.), Modern scientific research: сборник статей Международной научно-практической конференции (Пенза, 2022), Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университетінің 60 жылдығына арналған «Шоқан оқулары-26: Аймақпен өзара әрекеттесу мән мәтініндегі Қазақстан ғылымының даму векторлары» атты халықаралық ғылыми-практикалық конференциясында (Көкшетау, 2022), Seventh International Scientific Conference. Alternative energy sources, materials and technologies. AESMT'24. (Sofia, Bulgaria, 14 - 15 May 2024).

Жарияланымдар. Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша 27 жұмыс жарияланды, оның ішінде Scopus дерекқорына кіретін басылымдарда 3 жұмыс, ҚР ҒЖБМ Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті бекіткен тізбеден басылымдарда 8 жұмыс, халықаралық конференциялар материалдарының жинағына кіретін басылымдарда 10 жұмыс, 1 басылымдарда жұмыс республикалық ғылыми-практикалық конференциялар материалдарының жинағына кіретін басылымдарда, 2 жұмыс РҒДИ дерекқорына кіретін басылымдарда, 1 жұмыс республикалық журналда және 1 монография баспаға шықты.

Сонымен қатар, бірлескен авторлықта пайдалы модельге патент алынды: 14.02.24 ж. №9072 «Құрамалы қалақшалары бар көлденең осьтік жел электр қондырғысы».

Автордың жеке үлесі. Автормен айналмалы цилиндрлер және цилиндрлердің осьтеріне қатысты қозғалмайтын қалақшалары бар құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысын жобалау және құру бойынша жұмыстар жасалды. Автор жел энергетикалық қондырғысының зертханалық және тәжірибелік үлгісін жасауға тікелей қатысты. Зертханалық және полигондық эксперименттер жүргізілді. Зерттеудің алынған сандық және эксперименттік нәтижелерін талдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп орындалды. Жарияланған жұмыстарды жазу диссертанттың тікелей қатысуымен бірлескен авторлардың бірлескен күш-жігерімен жүзеге асырылды.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы. Диссертациялық жұмыстың құрылымына, мақсатына жету үшін шешілуі қажет міндеттермен анықталады. Диссертация кіріспеден, 6 бөлімнен, қорытындыдан, 120 пайдаланылған әдебиеттер тізімі мен қосымшадан және 135 бет машинкамен басылған мәтіннен тұрады. Жұмыста 152 сурет пен 5 кесте бар.

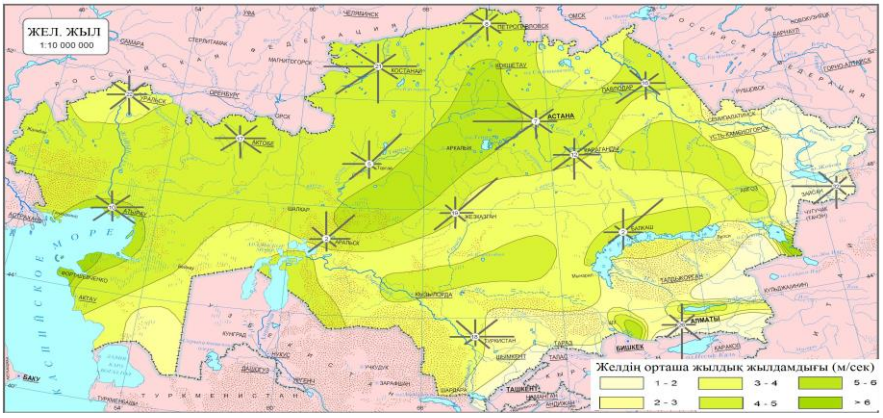
1 КӨЛДЕНЕҢ ЖӘНЕ ТІК АЙНАЛУ ОСІ БАР ӘРТҮРЛІ ГЕОМЕТРИЯЛАРЫ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРДЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫ

1.1 Зерттелетін тақырыптың өзектілігі

Қазақстан жел энергиясының орасан зор қорының көзі болып табылады. Әсіресе қатты жел Каспий теңізінің маңында, таулардың далалары мен шатқалдарында байқалады. Аумақтың көп бөлігінде желдің жылдамдығы көктем мен күзде 20-35 м/с дейін жетеді [1]. Ал желдің болжамды әлеуеті 1820 млрд. кВт·сағ құрайды [2].

Сондықтан жаңартылатын энергия көздерінің ішінде жел энергетикасы перспективалы бағытқа айналуы мүмкін [3, 4]. Елдің жел әлеуетін жел атласының көмегімен бағалауға болады, ол әр түрлі аймақтардағы жел жылдамдығының биіктікке таралуын көрсетеді (1.1-сурет):

Жел атласына сәйкес жел энергиясының әлеуеті жоғары учаскелер (7-8 м/с) шамамен 50 000 км^2 алып жатыр. Қазақстан аумағының шамамен 50% - ы 30 м биіктікте желдің жылдамдығы 4-5 м/сек құрайды, ең жоғары жел әлеуеті Каспий теңізі - Атырау және Маңғыстау облыстарында, сондай-ақ Солтүстік және Оңтүстік Қазақстанда бар. Қазақстанның шығыс облыстары жел электр станциялары үшін ең төменгі әлеуетке ие, мұнда орташа жылдамдық 5 м/с құрайды (1-сурет).



Сурет 1 – Қазақстанның жел ресурстарының картасы

Жел - атмосфералық қысымның айырмашылығынан туындайтын ауа массаларының қозғалысы. Бұл біркелкі емес қыздыру жер бетінің тұрақты айналым ағыны арқылы пайда болуына байланысты пайда болады. Өз кезегінде, жел табиғи шығу тегі жеткілікті жақсы энергия көзі болып табылады.

Қазақстан ғалымдары Республика климатының кейбір ерекшеліктерін, мысалы, желдің жылдамдығы 25 м/с-тан асатын және екпінді ескеретін ЖЭҚ құрды. Олар негізінен тік осьтік жел турбиналары.

Мәселен, М.М. Майлабаевтың өнертабысы негізінде 2000 жылы электр энергиясының өзіндік құны төмен (1,5 тг/кВт·сағ) және экологиялық аспектіде басқа ЖЭК-тен жоғары (қозғалтқыштың айналу жиілігі минутына 40

айналымға дейін төмен жиілікті тербелістер мен шуды болдырмайды) 3-60 м/ с диапазонында жұмыс істейтін жел қондырғысының конструкциясы әзірленді.

Д.А. Қонаев атындағы Тау-кен институтында Н.С. Буктуковтың басшылығымен «Буктуков ЖЭС» [5] перспективалық конструкциясы әзірленді, онда қамту бетінің ауданының өзгеруі жартылай цилиндрлердің жылжуымен емес, айналуымен жүреді, бұл қуатты едәуір арттыруға мүмкіндік береді.

1.2-суретте Буктуков жел электр станциясының суреті көрсетілген.

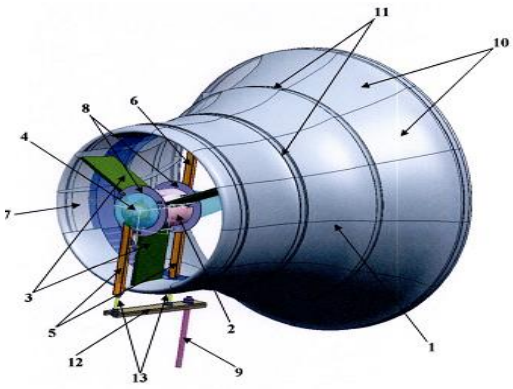
Сурет 1.2 – Буктуков ЖЭС [5, б. 2]

Карусель түріндегі жел қондырғысының ең көп таралған түріне қазақстандық профессор Ш.А. Ершин бастаған ғалымдар тобы әзірлеген Бидарье жел қондырғысы жатады (1.3-сурет), авторлардың айтуынша, екі тәуелсіз генератормен байланысқан екі коаксиалды біліктерде бірдей (немесе қарама-қарсы) айналу бағыттары бар екі бірдей Дарье жел турбиналары бекітілген өте жоғары (ЖЭПК) бар. Бұл жел энергиясының көп мөлшерін сол қамту бетінен алып тастауға мүмкіндік береді, өйткені әр жолы турбиналардың қалақтары жел жағын айналып өтіп, жел энергиясының 26% – ын тез жүрісті ағынынан, ал желден алыс жағынан – тек 12,5% - дан алып тастайды, нәтижесінде ЖЭПК теориялық шегі $К_{иэв}$ 77% - ға дейін жеткізіледі, іс жүзінде 0,63 коэффициент жүзеге асырылады [6 - 10].

Сурет 1.3 – 7 кВт қуатпен қарама-қарсы айналатын турбинамен Бидарье жел қондырғысы [6, б. 42]

Сондай-ақ, техника ғылымдарының докторы, профессор Х.Ж. Байшагиров әзірлеген диффузорлық типтегі Жел энергетикалық қондырғысы да белгілі. [11, 12].

1.4-суретте Х.Ж. Байшагиров әзірлеген жел энергетикалық қондырғысы көрсетілген.



1-диффузор, 2-екі консольді генератор, 3 – қалақшалар, 4 – консоль, 5,6 – тіректер, 7 – қуат сақинасы, 8 – жиектер, 9 – діңгек-тірек, 10 – сегменттер, 11 – байлау таспалары, 12-айналмалы құрылғының үстірті, 13 - төменгі ұштары

Сурет 1.4 – Жел энергетикалық қондырғы [12, б. 3]

Қазақстанда қауіпсіз, тиімді жел энергиясы негізінде генераторларды әзірлеу, құру және сериялық өндіру жөніндегі жоба басшысы Жанболат Музбаевтың басшылығымен Tree Energy конструкторлық бюросының базасында біздің қатты желге төтеп беретін және жел ағынының төмен жылдамдығында да электр энергиясын өндіруге мүмкіндік беретін отандық жел генераторларының (1.5-сурет) өндірісі 2022 жылы басталған [13].

Сурет 1.5 – Астана қаласында орнатылған отандық (Tree energy) жел қондырғысы

Енді бір шетелдік ғалымдардың әзірлеген жел энергетикалық қондырғыларын қарастырсақ, 2002 жылы Оңтүстік Орал федералды университетінің энергетикалық инженерлер тобы – Сергей Щеклейн, Александр Попов, Игорь Бурдин және Константин Горелый – Магнус

эффектісін күшейту үшін спиральды шнектермен жабдықталған айналмалы қалақшалары бар жел-гидроэнергетикалық қондырғыны патенттеді [14]. 2007 жылы бес айналмалы спираль тәрізді қалақшасы бар 12 кВт Spiral Magnus Wind Turbine жел генераторы тұрақты түрде іске қосылды (1.6-сурет).

Сурет 1.6 – Магнус спиральды жел турбинасы

Беларуссияда әлемдік тәжірибеде алғаш рет Аэрола фирмасы Беларусь ҰҒА қызметкерлерінің ұжымымен бірлесіп Минск қаласының округтік жолының жанында орнатылған қуаты 100 кВт роторлы типтегі тәжірибелі жел қондырғысын құрды (1.7-сурет). Турбина роторының диаметрі – 36 м, желдің болжамды жылдамдығы – 9,5 м/с.

Сурет 1.7 – Роторлы типтегі тәжірибелі жел қондырғысы

«ЭкоДом» беларусь-неміс қоғамдық бірлестігі 2001 жылы қуаты 250 кВт болатын және 2002 жылы қуаты 600 кВт болатын Магнус эффектісіне негізделген жэл энергетикалық қондырғыларын (ЖЭҚ) жасады (1.8-сурет) [15].

Американдық Helix Wind компаниясы спираль тәрізді қалақтары бар жел генераторын жасады. Бұл жел генераторы тік типті, тек екі қалақшамен жабдықталған [16]. Олар өте спираль тәрізді және түтікке айналдыра бастаған, бірақ жарты жолда тоқтаған қағаз парағына ұқсайды. Қалақшалар бір-біріне диаметрлі қарама-қарсы орналасқан және олардың күрделі қисық пішініне байланысты олар кез-келген бағыттан, тіпті тік ағындардан да желді ұстай алады (1.9-сурет).

а) ә)

а) қуаты 250 кВт, ә) қуаты 600 кВт

Сурет 1.8 – Бірінші өнеркәсіптік ЖЭҚ

Есептеулерге сәйкес, бұл жел генераторы желдің жылдамдығы 3,5 м/с-тан жоғары болған кезде оның бағытына, ағынның біркелкілігіне және басқа параметрлеріне қарамастан энергия өндіре алады. Құрылымның өлшемдері 2,6×1,2 м және 4 метрлік діңгекте орналасқан. Жел генераторының максималды қуаты-2,5 кВт.

Сурет 1.9 – «Helix» тік осьті жел турбиналары

Жапондық инженер Атсуши Шимизу әзірлеген Magnus турбинасында дәстүрлі қалақшалардың орнына тік оське орнатылған айналмалы цилиндрлер бар. Magnus VAWT – тің басты ерекшелігі – тік ось, бұл жел турбинасын басқаруды едәуір жеңілдетеді, өйткені ротордың орнын жел бағытына байланысты өзгерту қажет емес (1.10-сурет).

Бұл Magnus турбинасында дәстүрлі қалақшалардың орнына тік оське орнатылған айналмалы цилиндрлер бар. «Магнус эффектісі» мен «тік осьтің» тіркесімі турбинаны желдің жоғары жылдамдығында пайдалануға мүмкіндік береді, сонымен бірге құрылымның беріктігін арттырады және өндіріс шығындарын азайтады [17].

Бүгінгі таңда отандық әзірлеушілерден жел қозғалтқыштарының көлденең айналу осі бар Қазақстан аумағында бәсекеге қабілетті шағын қуатты

жел энергетикалық қондырғылары іс жүзінде жоқ, соның салдарынан ЖЭҚ жетілдіру саласындағы жұмыс жел қозғалтқышының көлденең айналу осімен жеткілікті өзекті болып көрінеді.

Сурет 1.10 – Тік осьті Magnus жел турбинасы

Әрі қарай айналмалы цилиндрлердің аэродинамикасын кең ауқымда түсіну үшін цилиндрлердің аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеуді қарастырамыз.

1.2 Айналмалы цилиндрлер түріндегі қалақшаның аэродинамикасы

Цилиндрді көлденеңнен орай ағуын қарастырайық. Дипольдің жылдамдық өрісіне біртекті жазық ағымды үстінен салу нәтижесінде идеал сұйықтың дөңгелек цилиндрді орап өтуінің негізгі есептеу формулары алынады. Цилиндрдің беті бойынша жылдамдықты үлестіру формуласы арқылы өрнектеледі [18]:

$$U = 2U_{\infty} \sin\theta\,, \tag{1.1}$$

мұндағы

U_{∞} - денеге жақындап келе жатқан ағынның жылдамдығы;

Θ - алдыңғы кризистик нүктеден бастап саналатын дене бетінің қарастырылып отырған нүктесінің бұрыштық координатасы.

(1.1) теңдеуден көрініп түрғандағыдай, ағынның тармақталған нүктелерінде (кризистік нүктелерде) сұйықтың жылдамдығы нөлге тең, ал мидельдік қимада $\Theta = \pm\frac{\pi}{2}$ болған кезде, ол өзінің ең үлкен мәнін қабылдайды. Жылдамдықтың (1.1) таралуын Бернулли теңдеуін қолдана отырып, цилиндрдің бетіне түсетін қысымның таралуын келесі түрде анықтауға болады:

$$\bar{\mathrm{P}} = \frac{\mathrm{P} - \mathrm{P}_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} = 1 - 4\sin^2\theta, \tag{1.2}$$

мұндағы

$\bar{P}$ – өлшемсіз қысым коэффициенті;

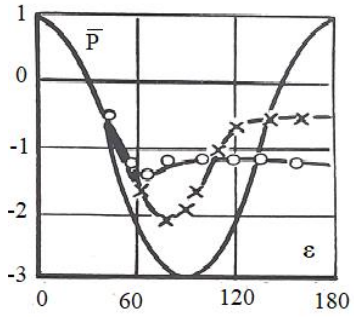
P – дене бетіндегі қысым;

P_∞ – цилиндрдің алдыңғы бөлігіндегі ағынның қысымы;

$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$ – келер ағынның динамикалық арыны.

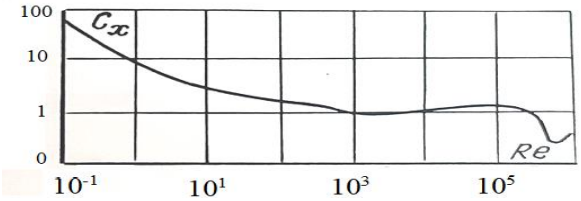
Есептеу нәтижелерін (1.1) және (1.2) денелер бетіндегі тәжірибелік қысымның таралуымен салыстыру тек қана ағынды денелер бетінің алдыңғы бөлігінде қанағаттанарлық келісім береді. Алдыңғы кризистік нүктесінен қашық болған сайын жылдамдықтың есептелген және тәжірибелік үлестірімдерінің айырмашылығы барған сайын өседі [19].

Үйкеліс күшінің әсерінен ағын денелердің бетінен және шамамен $\varepsilon=82^0$ бұрышында дағдарысқа дейінгі ағу режимінде және $\varepsilon=120\text{-}140^0$ кезінде дағдарыстан тыс ағу режимі аймағында шығады [20]. Дағдарысқа дейінгі және шамадан тыс ағу режимдеріндегі шексіз ұзындықтағы көлденең созылған цилиндр бойымен қысымның таралуы 1.11-суретте, ал 1.2-суретте Re санына маңдайлық кедергі коэффициентінің тәуелділігі көрсетілген.



(--- теория; ° - Re =1.06 ·10^5 кезіндегі тәжірибе; x- Re =2.12 ·10^5 кезіндегі тәжірибе)

Сурет 1.11 – Тікелей сызықты потенциалды ағынмен айналымсыз цилиндр бетіне қысымның таралуы

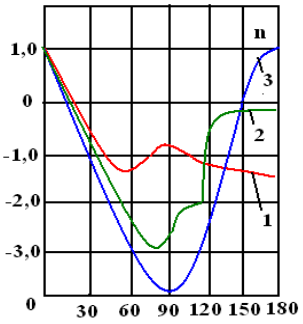


Сурет 1.12 – Дөңгелек Цилиндрдің кедергі коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі

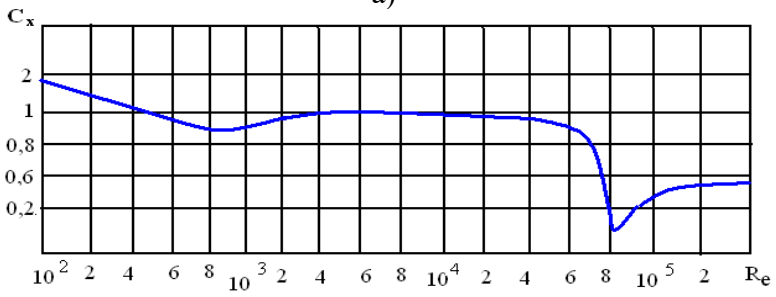
Көріп отырғаныңыздай, кризистік нүктеге дейінгі ағу режимінде цилиндр бетіндегі минималды қысым $\varepsilon=70\text{-}75^0$ мәндер аймағында жетеді және цилиндр үшін P=-(1,4-1,5) құрайды [21]. Ағынның денелер бетінен бөліну нүктесінен тыс артқы аймақта статикалық қысым шамамен біркелкі бөлінеді.

$Re>Re_{кр}=(2\text{-}3)\cdot 10^5$ кезінде денелердің бетіндегі қысымның таралуы оның сұйық ағу теориясы бойынша таралуына біршама жақындайды. Осының арқасында денелердің қарсылық коэффициенттері күрт төмендейді [22-24].

Сұйық ағынындағы инерция күші мен тұтқырлық күшінің қатынастарының тәуелділігіне байланысты цилиндрдің орай ағу режимдерінің бірнеше түрлері болады. Рейнольдс сандарының мәндеріне байланысты цилиндрді орай ағудің негізгі режимдері 1.13-суретте көрсетілген.



а)



ә)

а) қысым коэффицентінің цилиндрдің беті бойынша таралуы: 1 – кризиске дейінгі режим, 2 – аса кризистік режим, 3 - есептелген;
ә) кедергі коэффицентінің Re санына тәуелділігі.

Сурет 1.13 – Цилиндрді біртекті шексіз ағынмен орай ағу

Рейнольдс санының $\mathrm{Re} << 1$ өте аз мәндерінде серпімділік күштері үйкеліс күштеріне қарағанда бір шама аз болып келеді. Мұндай сұйықтың цилиндрді орай ағуы цилиндрдің соңғы кризистік нүктесінде ғана дененің бетінен ажырайды.

Теориялық жуықтау есебі пластикалық ағындар үшін Новье – Стокс теңдеулеріндегі инерциялық мүшелерді дербес есептеулері Г.Ламб [25] және [26, 27] еңбектерінде орындалған.

Ламб бойынша $\mathrm{Re} < 0{,}5$ үшін цилиндрдің ұзындық бірлігіне келетін кедергі келесі түрде анықталады:

$$W = \frac{8\pi\mu U_\infty}{1 - 2\ln\left(\frac{1{,}78\pi}{8}\mathrm{Re}\right)}, \qquad (1.3)$$

мұндағы

μ - динамикалық тұтқырлық.

Бұл теңдеуден цилиндрдің қозғалысы кезіндегі кедергісі жылдамдық пен тұтқырлықтың бірінші дәрежесіне пропорционал екендігін байқауға болады. Осыдан цилиндрдің кедергі коэффициенті

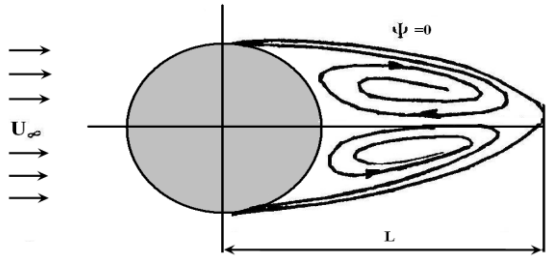
$$C_x = \frac{2W}{S\rho U_\infty^2} = \frac{16\pi}{\mathrm{Re}\left[1 - 2\ln\left(\frac{1{,}78\pi}{8}\mathrm{Re}\right)\right]} = \frac{16\pi}{\mathrm{Re}(4{,}004 - 2\ln\mathrm{Re})} = \frac{8\pi}{\mathrm{Re}(2{,}002 - \ln\mathrm{Re})}, \quad (1.4)$$

мұндағы

S – цилиндрдің ұзындық бірлігіне келетін модельдік қимасының ауданы Рейнольдс саны өсуіне байланысты кемиді.

Re санының өсуіне байланысты инерциялық күштер елеулі роль атқара бастайды және $\mathrm{Re} > 5$ болғанда цилиндрді орай ағу жаңа сипатқа ие болады.

Сұйық ағыны цилиндр бетінен соңғы кризистік нүктеге жетпей үзіледі. Дененің соңында із осіне қарағанда симметриялы орналасқан және қарама – қарсы бағытта айналатын қос орнықты құйындар пайда болады (1.14-сурет).



Сурет 1.14 – Цилиндр соңындағы ағын іздерінің сүлбесі,
L – циркуляциялық аймақтың ұзындығы

Бұл құйындар (1.14-сурет) дененің соңында ток функциясының $(\psi = 0)$ нольдік қисықтарымен шектелетін циркуляциялық аймақты құрайды.

Сұйықтың бір бөлігі аймақтың ортасында дененің бағытымен, ал сыртқы бөлігінде келер ағынның бағытымен қозғалады.

Кері токтар аймағы сондай-ақ да жылдамдықтың бойлық құраушысы $(U = 0)$ нөлге тең болатын тұйық бетпен шектелген.

Тәжірибелер көрсеткендегідей [28], циркуляциялық ағынның аймағының өлшемдері Re санының өсуімен бірге артады және $\mathrm{Re} \approx 40$ болғанда циркуляциялық аймақтың ұзындығы $L/d \approx 3{,}0$ шамасын құрайды.

$\mathrm{Re} > 40$ болғанда іздің циркуляция аймағындағы қозғалыстың орнықтылығы жойылады, құйындар симметриялық бола бастайды және дене бетінен біртіндеп үзіле отырып, келер ағынмен қоса кетеді.

Нәтижесінде дененің ізінде қозғалыстың жаңа түрі пайда болады. Бұл Карманың «құйынды жол» деп аталатын дененің бетінен периодты түрде үзіліп, құйынның ағынымен бірге кететін ерекше сипаты болып табылады. Тәжірибе жүзінде байқалғандай цилиндрдің соңындағы іздегі ағынның бұл түрі орай ағудің шектеусіз біртекті ағынның $\mathrm{Re} \approx 2 \cdot 10^5$ санының шамасына дейін,

шекаралық қабаттағы сұйықтық ағыны ламинарлық болғанға дейін сақталады. Шекаралақ қабаттың цилиндрдің бетінен үзілу орны $\mathrm{Re} = 10^4 \div 2 \cdot 10^5$ шамасының аймағында өзгермей қалады және $\theta \approx 82^0$ болады.

Re санының әрі қарай өсуімен, оның реті $4 \cdot 10^5$ (ағынның төменгі турбуленттік деңгейінде) жағдайындағы сияқты кедергі шапшаң 1,2 -ден 0,3-ке дейін түседі және шекаралық қабаттың үзілу нүктесі ағын бойымен төмен қарай жылжиды. Цилиндрдің кедергі коэффиценті 0,75-ке тең болатын Рейнольдс санының мәнін $\mathrm{Re}_{кр}$ критикалық саны деп есептеуге шешім қабылданған.

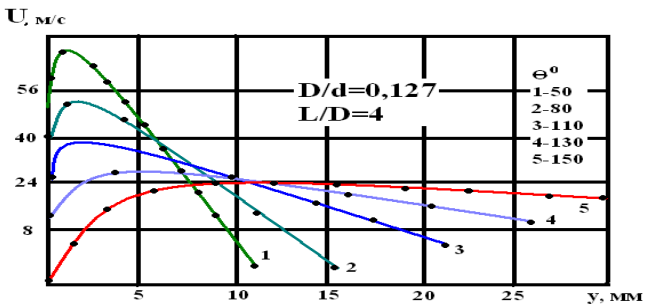
$\mathrm{Re}_{кр}$ шамасы келер ағынның турбуленттік деңгейі мен цилиндр бетінің кедір - бұдырлығының өсуіне байланысты кемиді.

Сонымен, цилиндрдің бойымен ағу көрінісінің күрделі болғандығы соншалықты, оның аналитикалық сипаттамасын берудің өзі үлкен қиындық тудырады. Негізінен шекаралық қабаттағы ағынды есептеу шекаралық қабаттан тыс берілген жылдамдықтың үзілу нүктесіне дейінгі таралуы шекралық қабат теориясының әдістерімен беріледі.

Алғашқы болып ағын бағытына перпендикуляр осьті цилиндрлік дене үшін шекаралық қабат есебін Г.Блазиус [29] берді, ал кейінірек К.Хименц [30] пен Л.Хоуарт [31] жалғастырды. Содан кейін Н.Фреслинг пен А.Ульрих біршама қосымшалар енгізді. К.Хименц алған қысымның эксперименталды таралуын қолдана отырып, К.Польгаузен цилиндрда шекаралық қабаттың жуықтау есебін шығарды [32]. Нәтижесінде цилиндр бетіндегі шекаралық қабаттың жылдамдығының таралуы және шекаралық қабаттың үзілу бұрышының мәні $\theta = 82^0$ алынды және ол оның эксперименталды мәндерінен сәйкес келеді.

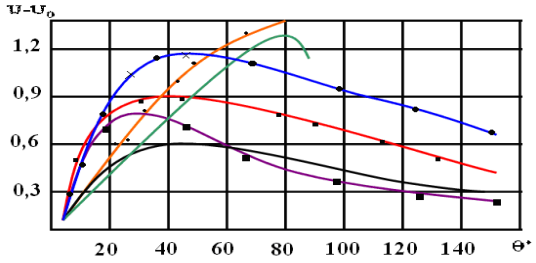
А. Том [33] мен А. Фейдж [34] сәйкесінше $\mathrm{Re} = 28 \cdot 10^3$ және $1{,}03 \cdot 10^5 < \mathrm{Re} < 3{,}33 \cdot 10^5$ үшін цилиндрдің ламинарлық шекаралық қабат жағдайын зерттеді.

Шекаралық қабаттың дамуы. Жылдамдықты өлшеу шекаралық қабаттағы ағынның турбуленттік пульсациясының интинсивтілігін өлшеу цилиндрді ағыспен орай ағу көрінісін тереңірек түсінуге көмектеседі (1.15-сурет). Дененің беті бойынша қысымның таралуын оқып үйренуге көмегін тигізеді.



Сурет 1.15 – Цилиндрді орай ағатын ағыстың көлденең қимасындағы жылдамдықтың таралуы

Мысал ретінде 1.15-суретте цилиндрді орай ағатын ағынның жылдамдығының алғашқы өлшемдері $D/d = 0{,}127$ және $L/D = 4$ болғанда келтірілді. Абсцисса өсінде цилиндрдің бетінен радиальдық бағытта координата салынған. Ағынның жылдамдығын дененің бетінен алып тастағанға дейін ол максимумға жетеді де, сосын ағыстың сыртқы шекарасында нөлге дейін түседі. Дененің бетіндегі ағыс ішкі (жылдамдықтың максимум қисығына дейін) және сыртқы (жылдамдықтың максимум қисығынан кейін) деп екі аймаққа бөлінеді (1.16-сурет).



Сурет 1.16 – Цилиндрдің беті бойынша ағыстың максимальды жылдамдығының өзгеруі

Дененің ағыспен орай ағуындағы шекаралық қабаттың δ қалындығын, мысалы, дененің бетінен жылдамдығы $U = 0{,}99U_s$ болатын нүктеге дейінгі арақашықтық ретінде қарастыруға болады, мұндағы U_s- қарастырылып отырған ағыстың қимасындағы максимальды жылдамдық. Бұдан ағыстың орай ағуының жалпы көрінісін алу үшін дененің беті бойынша U_s максимальдық жылдамдықтың өзгерісін білу керек.

Цилиндрдің артындағы денеден алыс (80 калибрден көп) орналасқан ізде жылдамдықтардың қима бойынша таралуын алғаш Г. Шлихтинг теория жүзінде есептеді және тәжірибеде көрсетті. Артқы іздегі орташаланған ағынның сипаттамалы ерекшелігі болып жылдамдықтардың аффинажға ұқсас профилдеріндегі үлкен емес құлаудың бар болуы табылады [35].

Денеден алыс орналасқан артқы іздегі қысым практикалық тұрғыдан ұйытқымаған ағынның қысымына тең. А.Таусендтің [36] көп уақыттан кейін жасаған толық өлшеулері көрсеткендей, денеден алыс қашықтықта (200 калибрден үлкен қашықтықта) ағынның турбулентті сипаттамаларының таралуында да автомодельділік байқалады.

Бұл көзқарас пен дененің артқы облысындағы турбулентті ағысты тәжірибелік бақылаулар арасындағы үйлеспеушілікті Л.А. Вулис [37, 38] тапқан. Орай ағуы нашар әр түрлі денелердің артқы бетіне тікелей жақын іздегі турбулентті ағысты толық зерттеу С.И. Исатаев және Ж.С. Ақылбаев тарапынан жүргізілген [39-41].

Цилиндрді біртекті шексіз ағынымен айналдырудың негізгі аэродинамикалық режимдерінің қысқаша сипаттамасынан біз аталған денелердің айналасындағы қозғалыстың жалпы суреттерінде ұқсас режимдер бар деген қорытындыға келеміз. Аэродинамикалық суреттердің өзіндік

ерекшеліктері бар бұл ұқсастықтары қарастырылып отырған дененің жанындағы шекара қабатында болатын жылу алмасу процестеріне толығымен әсер етеді.

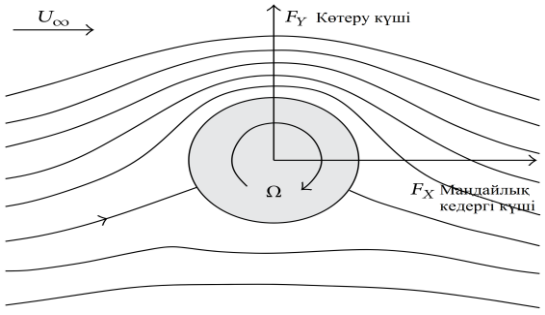
1.3 Магнус эффектісіне негізделген жел қондырғылары

Магнустың эффектісі – айналмалы дене сұйықтық немесе газ ағынымен айналғанда, денеге ағын бағытына перпендикуляр әсер ететін күш пайда болады [42]. 1852 жылы Генрих Густав Магнус (әйгілі неміс физигі және химигі) – екі нүктенің арасында жылдам айналатын жез цилиндрмен зертханалық тәжірибелер жүргізді. Цилиндр оңай ауытқитын жақтауға орналастырылды және оған желдеткіштен күшті ауа ағыны бағытталды. Цилиндрдің өз осіне және ауа ағынына перпендикуляр ауытқуы байқалды, айналу бағыттары мен ағындары сәйкес келетін бағытта. Содан бері бұл құбылыс «Магнус эффектісі» деп аталды [43].

Қазіргі уақытта әлемде кеңінен қолданылатын қалақшалы жел генераторлары тұрақсыз және желдің төмен жылдамдығында тиімсіз жұмыс істейді. Сондықтан Магнус эффектісін қолданатын жел қондырғылары өте қызықты, олардың негізгі артықшылықтары желдің төмен, бірақ жиі қайталанатын жылдамдықтарында 2-6 м/с көрінеді [44].

1.17-суретте радиусы R, бұрыштық жылдамдықпен **Ω** айналатын цилиндр, ρ тығыздығымен ауа ағынына орналасқан, сұйықтықтың ламинарлық жылдамдығымен U_∞ көрсетілген.

Теориялық тұрғыдан алғанда, F_Y көтеру күші және Fx маңдайлық кедергі қ күші деп аталатын ауа ағынына перпендикуляр бағытта көтеру күші жел роторына әсер етеді, бұл құбылыс Магнус эффектісі деп аталады. Теориялық тұрғыдан Fx кедергісінің күші нөлге тең болуы керек, бірақ бұл мән нөлге тең емес және цилиндр бетінің салыстырмалы жылдамдығының жоғарылауымен эксперименталды түрде дәлелденген [45].

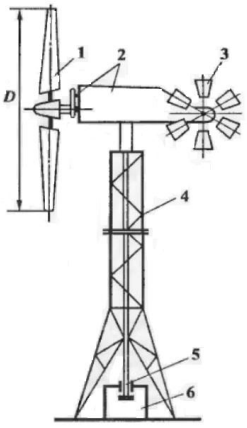


Сурет 1.17 – Ауа ағынындағы айналмалы цилиндрдің бүйір бетіндегі ағын іздері

Магнус эффектісіндегі жел электр станциясының жел дөңгелегі моделі жел энергиясын пайдалану коэффициенті (ЖЭПК) негізінде құрылады. Желді пайдалану коэффициенті жел ағынының жылдамдығына, цилиндрлік

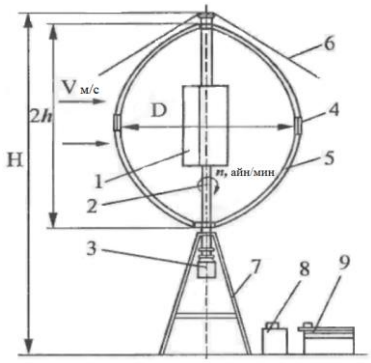
қалақтардың айналу жиілігіне және қондырғының жел дөңгелегіне байланысты [46, 47].

Тиісінше, МЕМСТ [48] сәйкес жел доңғалағының айналу осі жел жылдамдығының векторына параллель орналасқан жел қозғалтқышын – көлденең осьтік жел қозғалтқышы деп атайды (1.18-сурет). Айналу осі желдің жылдамдық векторына да, жерге де перпендикуляр орналасқан жел қозғалтқышы – тік осьтік деп аталады (1.19-сурет).



1 - жұмыс қалақшасы; 2-беріліс қорабы; 3-виндроза; 4-мұнара (діңгек);
5-қуат білігі; 6-генератор

Сурет 1.18 – Көлденең айналу осі бар ЖЭҚ құрылымдық сүлбесі



1-стартер («Савониус» роторы): 2 – генератор білігі; 3-электр генераторы; 4-тежегіш құрылғы; 5-жұмыс қалақшасы; 6-созылу белгілері; 7-тірек жақтауы;
8-кернеу түрлендіргіші; 9 - аккумулятор.

Сурет 1.19 – «Дарье» типіндегі тік айналу осі бар жел энергетикалық қондырғысының құрылымдық сүлбесі

Бірінші типтегі көлденең осьтік жел қозғалтқышының жел доңғалағы қанат тәрізді және ағын бағытына перпендикуляр тік жазықтықта айналады [49].

Мұндай жел энергетикалық қондырғылары бір, екі, үш немесе көп қалақшалы жел доңғалақтарын пайдаланады, ал соңғысының пайдалы әсер

коэффициенті (ПӘК) жоғарылайды, дірілді азайтады және желдің төмен жылдамдығында (<3 м/с) жұмыс істейді

Бірінші типтегі қондырғыларды пайдаланудың артықшылықтарын атауға болады:

– орнату сүлбелерін қолданудың бір түрі;

– қосымша құрылғыларсыз өздігінен іске қосуды қамтамасыз ету;

– аз массалық өлшемдер;

– ауа ағынын пайдаланудың жоғары тиімділігі.

Мұндай сүлбені қолданудың кемшіліктеріне мыналар жатады:

– мұндай қондырғылардың қалақтары адамдарға да, жануарларға да кері әсер ететін шу шығарады;

– қондырғыны желге бағыттау қажеттілігі;

– құрылыс механизмдеріне ауыр жүктеме;

– орнату қалақтарын өздігінен айналдыру мүмкіндігі жоқ.

Екінші типтегі құрылым күшті тік айналу осін және бірнеше параллель қалақшаларды немесе аэродинамикалық профильсіз жұқа қисық беттерді пайдаланады [50]. Бұл құрылым жел доңғалағы желдің кез-келген бағытында бір бағытта айналады және ауа ағынының бағытына байланысты емес. Жел қондырғыларының мұндай түрлерінде «Дарье» немесе «Савониус» роторымен генератор бар.

«Дарье» роторында айналу моменті құрылғының төменгі және жоғарғы жағынан оған бекітілген арнайы аэродинамикалық профилі жоқ екі немесе үш қисық қалақшаның көмегімен жасалады. Көтеру күші ауа ағынының ең жоғары жылдамдығы бар қалақшаның қиылысу сәтінде максималды болады. Дарье роторы бар қондырғыларды өздігінен іске қосу мүмкін емес, сондықтан күшті ауа ағыны немесе статор қажет, оны «Савониус» роторы деп те атайды. 1.10-суретте «Дарье» типіндегі тік айналу осі бар жел қондырғысының құрылымдық сүлбесі көрсетілген .

Қозғалып келе жатқан ауа ағынының әсерінен стартер іске қосылып, жұмыс қалақшасы айнала бастайды. Стартерден айналу моменті генератордың білігіне беріледі және электр энергиясын өндіру басталады. Содан кейін өндірілген энергия кейінірек пайдалану үшін аккумуляторларда сақталады. Бұл құрылымда тежегіш құрылғы стартердің тым үлкен айналымына жеткенде қалақшаларды толығымен тоқтату үшін қолданылады. Тірек жақтауы қондырғыны орнында сенімді бекіту үшін қызмет етеді. Кернеу түрлендіргіші айнымалыдан – тұрақты кернеу жасайды, бұл аккумуляторларды қуаттандыру үшін қажет. Созылу белгілері орнатудың жоғарғы бөлігін сенімді бекіту мақсатында кабельдермен бекітуге арналған.

Әлемде жел қондырғыларының шамамен 90% – ы көлденең-осьтік, ал қалған 10%-ы тігінен-осьтік типте қолданылады. Тік айналу осі бар қондырғылар экзотикалық немесе тәжірибелік үлгілер ретінде қолданылады.

Бұл төменде келтірілген бірнеше маңызды кемшіліктермен түсіндіріледі:

1) Көлденең осьтерге қарағанда төмен ПӘК (25% қарсы 45%).

2) Айналу жылдамдығы бірнеше есе төмен, ал бұл өз кезегінде сәйкес келетін қуатты генераторды қажет етеді (генератор жел қондырғысы құнының 70% – дан астамын құрайды).

3) Материалдарға деген сұраныстың артуы және өндірістегі күрделілік, бұл құрылымның салмағының артуына әкеледі.

4) Мұндай типтегі жел генераторлары 2 мВт-тан күшті емес, бұл олардың қолданылуын шектейді.

Жел генераторлары көлденең осьтік типтегі пропеллер жел генераторлары тиімділігі мен сенімділігіне байланысты кеңінен қолданылды [51].

1.4 Жел энергетикалық қондырғыны модельдеу әдістері

Қазіргі уақытта жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың өзектілігі байқалуда. Мұндай көздерге жел қондырғылары жатады. Жобаланған жаңа электр қондырғыларын кез-келген енгізу олардың электр жүйесімен жұмыс істеу режимдерін алдын-ала зерттеуді қажет етеді. Мұндай зерттеулерді компьютерлік динамикалық модельдеу жүйелерінің (SDM) көмегімен жүргізуге болады. MatLab бүгінгі күнге дейін Simulink [52] кіріктірілген SDM бар ең қуатты бағдарламалау ортасы болып табылады, оның ғылым мен техниканың әртүрлі бағыттары бойынша үлкен демонстрациялық кітапханасы бар. Бұл кітапханада электр энергиясының мәселелерін шешуге бағытталған Power System бөлімі болады.

Жел энергетикалық қондырғысы (ЖЭҚ) болып табылатын күрделі сызықты емес объект үшін егжей-тегжейлі зерттеулер кезінде математикалық модель жасау қажет, ол өте күрделі және оны зерттеуге ыңғайлы және кішігірім бөліктерге бөлуді қажет етеді. Әр модель әртүрлі дәрежедегі егжей-тегжейлері бар белгілі бір болжамдармен зерттелетін объект жұмысының жеке аспектілерін дәл сипаттауға мүмкіндік береді.

Жел энергетикасы саласында зерттеулер жүргізу кезінде әр түрлі модельдерді қолдану қажет, сондықтан техникалық және экономикалық себептерге байланысты табиғи эксперименттер әрдайым мүмкін бола бермейді.

Жел тербелістерінің жүйенің шығыс параметрлеріне әсерін бағалауға мүмкіндік беретін модельдер алынды. Қарастырылған модельдердің көмегімен апаттық процестерді бағалауға болады.

Математикалық модель нақты объектіні тек белгілі бір дәрежеде жуықтаумен(егжей-тегжейлі) сипаттайды. Бұл жағдайда модельдің түрі зерттелетін объектінің табиғатына да, зерттеу міндеттеріне де, модельдеу әдістемесіне, объектіні сипаттаудың қажетті дәлдігіне де байланысты. Жалпы қабылданған – математикалық модельдеуді үш негізгі түрге бөлу-аналитикалық, имитациялық және аралас [53].

Аналитикалық модельдеудің тән ерекшелігі – модельденген жүйе элементтерінің жұмыс істеу процестерін кейбір қатынастар түрінде жазу-дифференциалды, интегралдық, ақырлы айырмашылық немесе логикалық жағдайлар. Аналитикалық модельді келесі әдістермен зерттеуге болады [54].

1. Аналитикалық. Бұл жағдайда мақсат-қажетті сипаттамалар үшін әртүрлі тәуелділіктерді алу.

2. Сандық. Бұл жағдайда мақсат белгілі бір бастапқы деректермен сандық нәтижелерді алу болып табылады. Шешім жалпы түрде жоқ.

3. Сапалы. Шешімдер нақты түрде жоқ, бірақ шешімнің кейбір қасиеттерін бағалауға болады.

Аналитикалық модельдеуден айырмашылығы, имитациялық модельдеу принципі математикалық модельдің уақыт бойынша жұмыс істеу процесін қайталайтындығына және олардың өзара әрекеттесу логикасын және уақыт бойынша жүру реттілігін сақтай отырып, жүйеде болатын қарапайым оқиғаларға еліктейтіндігіне байланысты. Осылайша, жүйенің сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік беретін белгілі бір уақыт аралығында жүйенің күйі туралы ақпарат алу мүмкіндігі бар. Имитациялық модельдеу тиімділікті бағалаудың кейбір критерийлері бойынша оңтайлы болатын белгілі бір шектеулерде берілген сипаттамалары бар жүйені құру қажет болған кезде үлкен жүйелердің құрылымдық, параметрлік синхрондауының негізіне алынуы мүмкін [55].

1.5 Зерттеудің мақсаты мен міндеттерінің қойылымы

1. Көлденең айналу осі бар жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының математикалық моделін жасау және қалақшаның геометриялық пішінінің оңтайлы нұсқасын таңдау. Есептік тор үшін шекаралық шарттарды орнату.

2. Бір, екі және үш құрамалы қалақшалы ЖЭҚ зертханалық үлгісін әзірлеу.

3. Ауа ағынының әртүрлі жылдамдықтары мен бағыттарында құрамалы қалақшалы ЖЭҚ айналуындағы аэродинамиканы зерттеу бойынша эксперименттік зерттеулер жүргізу.

4. Т-1-М аэродинамикалық құбырда үш компонентті аэродинамикалық таразылар көмегімен әртүрлі ағын жылдамдықтарындағы көтеру күші мен маңдайлық кедергі күшін және тарту күшін өлшеу.

5. Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

6. Көлденең бағыттағы қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндрлер түріндегі құрамалы қалақшалы тәжірибелік жел энергетикалық қондырғысын жобалау және құрастыру.

7. Жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына ауа ағынының жылу физикалық параметрлерінің әсерін зерттеу.

1.6 Бөлім бойынша қорытынды:

- Көлденең және тік айналу осі бар әртүрлі геометриядағы жел қондырғылары бойынша ғылыми жұмыстарға әдеби шолу жасалды.
- Айналмалы цилиндрлер түріндегі қалақшалардың аэродинамикасының заңдылықтары қарастырылады.
- Зерттеудің мақсаттары мен міндеттері қойылды.

2 КӨЛДЕНЕҢ АЙНАЛУ ОСІ БАР ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

2.1 Қалақшаның геометриялық пішінінің оңтайлы нұсқасын таңдау

Жел энергетикалық қондырғыны жобалау және құру кезінде басты мақсат – берілген атмосфералық ауа-райы жағдайында максималды қуатқа қол жеткізу. Физикалық тұрғыдан бұл оңтайлы параметрлері мен пішіндері бар қалақшаларды жасау арқылы жүзеге асырылады. Қалақшалардың пішіні мен сызықтық өлшемдерінің өзгеруі қалақша мен жел қондырғысының аэродинамикалық коэффициенттеріне әсер етеді. Қалақшаны жасауға жел энергетикалық қондырғыны өндірудің барлық құнының шамамен 15-20% жұмсалады. Бірақ соған қарамастан, қалақшаның құрылымдық моделін жақсартудан алынған пайда айтарлықтай [56, 57].

Қалақшаның оңтайлы пішінін анықтау және оңтайлы композициялық материалды анықтау мәселесі күрделі, өйткені аэродинамикалық жүктеменің математикалық сипаттамасы күрделі және бірқатар шектеулер мен тапсырмаларды орындау қажет.

Қазіргі уақытта ЖЭҚ жобалаудың 3 түрі бар (2.1-сурет).

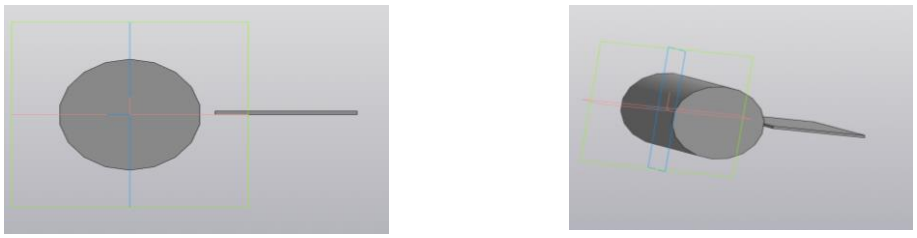
Сурет 2.1 – ЖЭҚ жобалау әдістері

Біздің жағдайда компьютерлік бағдарламаларды пайдалана отырып, жобалаудың сандық әдісі қолданылды. Жоғары өнімді жел қондырғысын жобалау мақсатында оңтайлы геометриялық пішіні бар цилиндрлік қалақша жасау қажет.

Цилиндрдің салыстырмалы ұзындығының көтеру күші және маңдайлық кедергі мәндеріне әсері туралы белгілі мәліметтер бар. Цилиндрлердің айналасындағы көлденең ағында цилиндр ұзартуының маңдайлық кедергі және көтеру күші коэффициентіне әсері жеткілікті екендігі анықталды [58].

Ғылыми жұмыста L/d = 40 салыстырмалы ұзындығында бұл коэффициенттің мәні шексіз цилиндр үшін мәліметтерден 18 % ерекшеленетіні анықталды [59]. Осыған сүйене отырып, қалақшаның оңтайлы өлшемдерін жобалау үшін алдыңғы жұмыстардың негізінде цилиндрдің ұзындығы мен диаметрінің және қозғалмайтын қалақшаның оңтайлы мәндерін таңдау керек.

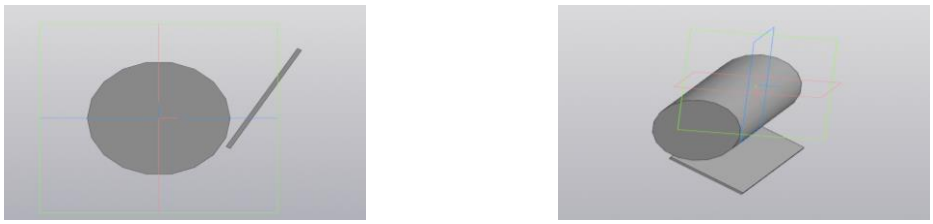
Танымал авторлар мен инженерлердің қолданыстағы жұмыстарының негізінде, сандық модельдеу көмегімен қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі орналасу бұрыштары бар 4 сандық қалақша модельдері жасалды (2.2-сурет).



а)

ә)

б)



в)

а) 0 градус кезінде; ә) 30 градус кезінде; б) 45 градус кезінде; в) 60 градус кезінде

Сурет 2.2 – Қозғалмайтын қалақшаның цилиндрге қатысты орналастыру нұсқалары

С.И. Исатаева, О. Жангунова, Қ. Құсайынов сияқты бірқатар авторлардың белгілі жұмыстарының жоғары тиімді нәтижелеріне назар аудара отырып [60, 61] ұзындығы 300 мм және диаметрі 50 мм болатын оңтайлы цилиндрлік қалақша жасалды. Қозғалмайтын қалақшаның ені 33 мм, ұзындығы 300 мм болды.

Цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның оңтайлы бұрышын анықтау үшін сандық модельдеу ANSYS WORKBENCH бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асырылды. Үш өлшемді модельдеу жүйесін қолдана отырып, 0, 30, 45 және 60 градус бұрыштары бар қалақшалардың 4 нұсқасы жобаланған. Ауа ағынының жылдамдығы 3-тен 12 м/с-қа дейін өзгерді.

Аэродинамикалық элементтің тиімділігінің көрсеткіші аэродинамикалық коэффициенттер болып табылады. (2.1) және (2.2) формулалары арқылы аэродинамикалық коэффициенттер сандық әдіспен есептелді.

Маңдайлық кедергі коэффициенті (2.1) формула бойынша есептеледі:

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho u^2 S}, \tag{2.1}$$

көтеру күшінің коэффициенті (2.2) формула бойынша есептеледі:

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho u^2 S}, \tag{2.2}$$

мұндағы

F_x – маңдайлық кедергі күші, Н;

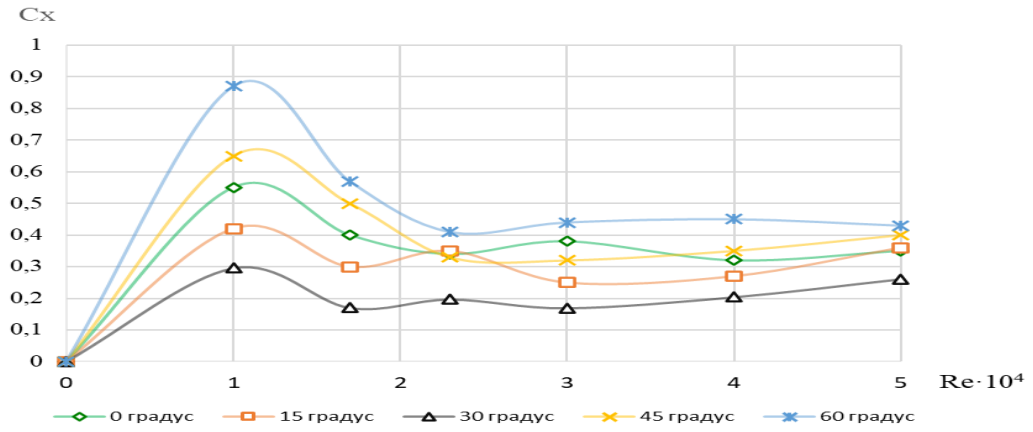
F_y – көтеру күші, Н;

ρ – ауаның тығыздығы, кг/м^3;

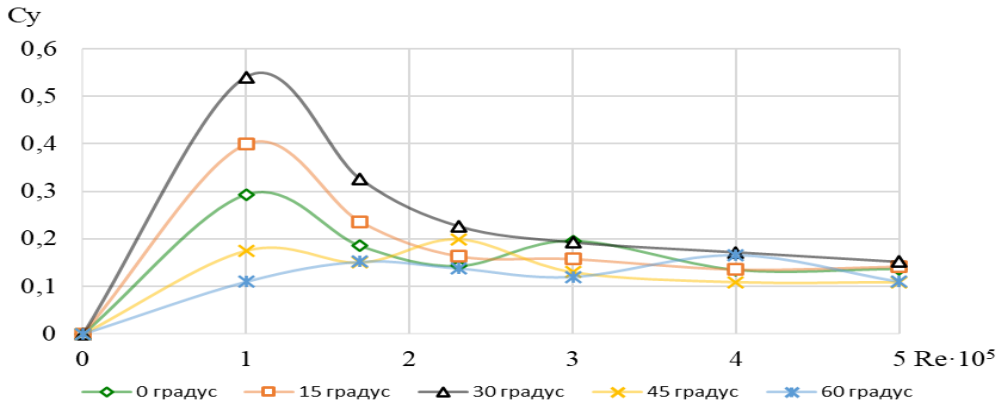
u – ауа ағынының жылдамдығы, м/с;

S – мидельді қиманың ауданы, м^2.

2.3 және 2.4-суреттерде цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның орналасуының әртүрлі нұсқалары кезіндегі Рейнольдс санына тәуелді көтеру күші мен маңдайлық кедергі күші коэффициентінің сандық есебінің нәтижелері көрсетілген.



Сурет 2.3 – Маңдайлық кедергі коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі



Сурет 2.4 – Көтеру күші коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі

2.3 және 2.4-суреттерден көрініп тұрғандай, қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градуста орналасқанда көтеру күші және маңдайлық кедергі күшінің коэффициенттерінің оңтайлы мәндері алынады: Рейнольдс саны $1 \cdot 10^5$ кезінде 0,54 және 0,29.

0°, 15°, 45° және 60° кездегі басқа төрт үлгімен салыстырғанда, 30°-де құрамалы қалақша максималды көтеру күші мен минималды маңдайлық кедергі күшін жасайды. Әрі қарай сандық есептеулерде 30°-де цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның орналасуымен құрамалы қалақшаның математикалық моделі пайдаланылды.

Модельдеу үшін қалақша профилінің үш өлшемді моделін жасау. Design Modeler-де жұмыс істеу.

Модельдеудің негізгі мақсаты – жел энергетикалық қалақшаның құрамалы қалақшасының жаңа құрылымының аэродинамикалық коэффициенттерін зерттеу.

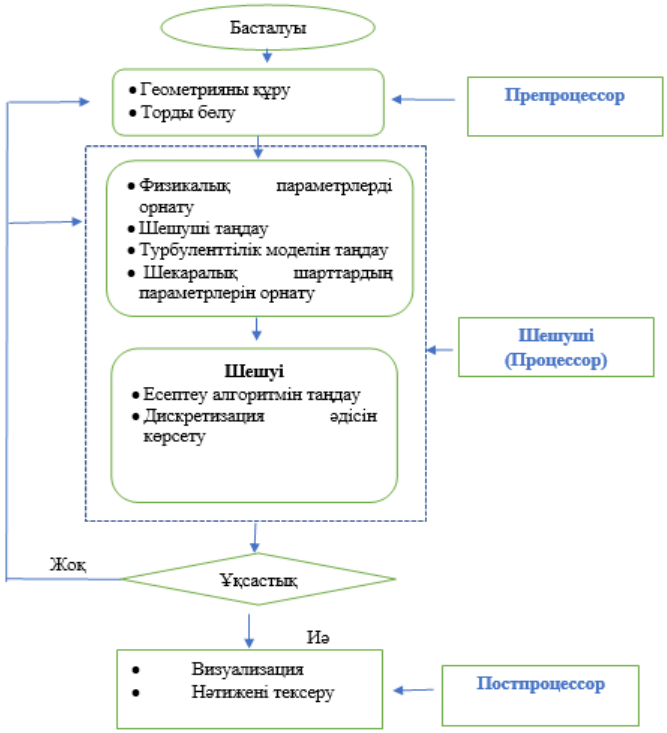
Сандық модельдеу препроцессоры зерттелетін модельдің геометриясын құруды, зерттеудің сапасы мен жылдамдығын жақсарту үшін модельді ақырлы элементтік торларға бөлуді және кіріс және шығыс шекаралық шарттарды орнатуды қамтиды [62-64]. Препроцессорға әмбебап CAD редакторы DesignModeler және ANSYS Meshing тор генераторы сияқты ANSYS Workbench өнімдері кіреді [65].

Шешуші келесідей параметрлерді анықтайды: турбуленттілік моделі (ламинарлы немесе турбулентті), шекаралық шарттардың параметрлері (ағын жылдамдығы, кіріс және шығыс қысымы, айналу жиілігі және т.б.), шешуші әдістер (SIMPLE, SIMPLEC, PISO, COUPLED), инициализация әдістері (гибридті немесе стандартты), қайталану саны.

Алынған нәтижелер мен 3D визуализацияны тексеру үшін постпроцессор қолданылады.

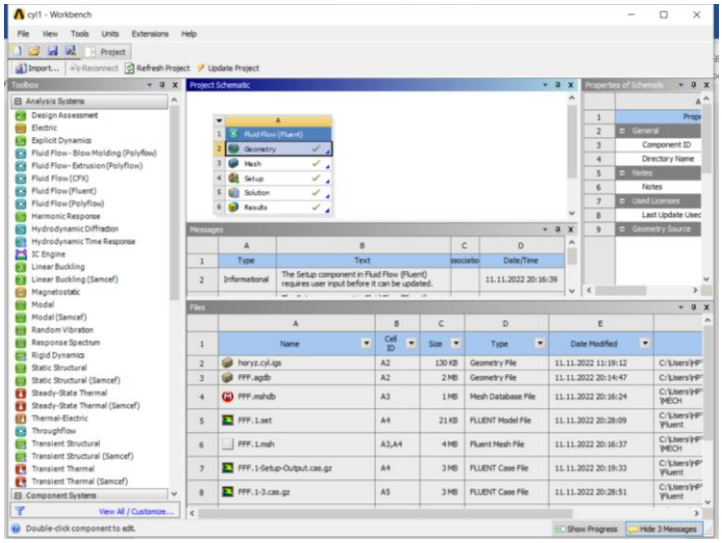
Сандық модельдеу кезеңдері 2.5-суретте көрсетілген.

ANSYS өнімдері біріктірілген ANSYS Workbench платформасын пайдаланып, қарастырылып отырған мәселенің шешімдерін қарастырамыз [66] (2.6-сурет).



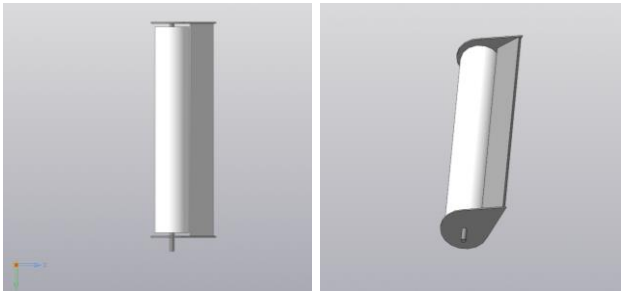
Сурет 2.5 – Математикалық модельдеу кезеңдері

Біріншіден, имитациялы аэродинамикалық құбырда сыналатын қалақшаны дәл өлшеу үшін қалақша геометриясы және сұйық ортаның есептелген аймақтары ANSYS DesignModeler – де модельденеді [67].



Сурет 2.6 – ANSYS Workbench жұмыс терезесі

3D компасы мен DesignModeler үш өлшемді модельдеу жүйесін қолданамын, XYZ үш өлшемді жазықтықта қалақша моделі CAD (computer-Aided Technologies) құрылады (2.7-сурет). Қалақшаның оңтайлы геометриялық мәндері 2.1-кестеде келтірілген.



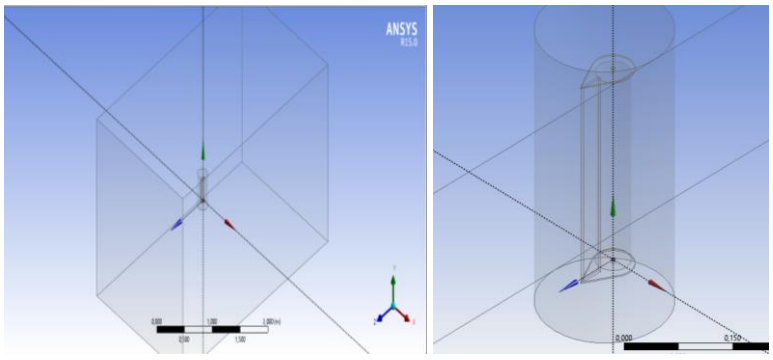
Сурет 2.7 – Үш өлшемді (3D) жазықтықтағы құрамалы қалақша

2.7-суреттен көрініп тұрғандай, құрамалы қалақша цилиндрден және екі жағынан негізге тамшы тәрізді диск түрінде бекітілген қозғалмайтын қалақшадан тұрады.

Кесте 2.1 – Қалақшаның геометриялық параметрлері

Параметрлер	Мәндері
Цилиндрдің ұзындығы, L	300 мм
Цилиндрдің диаметрі, d	50 мм
Қозғалмайтын қалақшаның биіктігі, a	310 мм
Қозғалмайтын қалақшаның ені, b	33 мм
Қозғалмайтын қалақшаның қалыңдығы, c	4 мм
Тамшы тәрізді негіздің ұзындығы, l	94 мм
Тамшы тәрізді негіздің радиусы, R	30 мм

Enclosure бағдарламасының көмегімен у осінің айналасында айналу шарттарын белгілеу үшін радиусы 0,05 м болатын құрамалы қалақшаның айналасында цилиндрлік есептелген ішкі аймақ құрылды. Қамтитын кеңістіктің айналасында шекаралық жағдайларды орнату үшін цилиндрлік қосалқы аймақты алып тастағанда 1 м; 1 м; 1,5 м; 1;1;2 м өлшемдері бар параллелепипед түріндегі аэродинамикалық құбырды имитациялайтын ішкі аймақ құрылды (2.8-сурет).



Сурет 2.8 – Қалақшаның айналасындағы есептік аймақ

Қорытындылай келе, әмбебап CAD редакторында логикалық операцияларды (Boolean) жүргізгеннен кейін, қалақшаны алып тастағанда 2

дене – цилиндр, сондай-ақ цилиндрді алып тастағанда параллелепипед құрылды. Әрі қарай жасалған модель торлы препроцессорға импортталады.

Ағын өрісін сандық талдау үшін аймақтың есептік торын таңдау. Есептік тор үшін шекаралық шарттарды орнату.

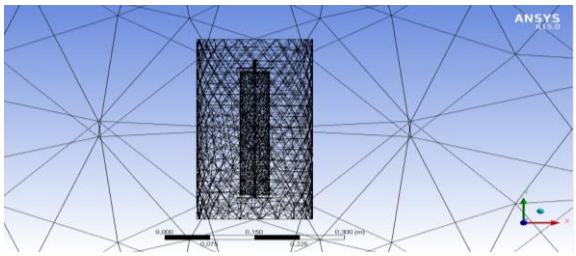
Есептелген торды құру модельдеу процесінде шешуші сәттердің бірі болып табылады, ол алынған нәтижелердің дәлдігі мен ұқсастығына әсер етеді.

Үш тордың аэродинамикалық коэффициентінің болжамды мәндерін салыстыра отырып (2.2-кесте), соңғы екі кіші тордың арасында айтарлықтай айырмашылық жоқ, бірақ, бірінші өрескел тордан үлкен ауытқу бар. Есептеу шығындары мен ақылға қонымды дәлдікті ескере отырып, 248723 ұяшықтары бар 3 тор жеткілікті.

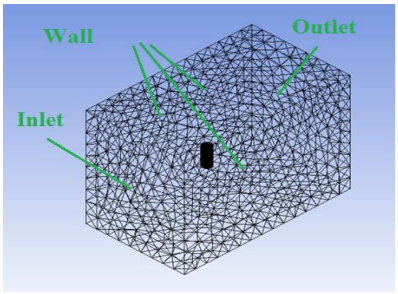
Кесте 2.2 – Үш тордың аэродинамикалық коэффициентінің болжамды мәндерін салыстыру

	1-тор	**2-тор**	**3-тор**
Ұяшықтар саны	187450	248723	478400
Көтеру күшінің коэффициенті	0,031	0,037	0,036
Ауа ағынының жылдамдығы	9 м/с	9 м/с	9 м/с

ANSYS Meshing торлы препроцессоры барлық дерлік физикалық тапсырмалар үшін жоғары сапалы есептелген торларды жасайды [68]. Соңғы-көлемді тор тетрагональды ұяшықтардан тұрады. XY жазықтығындағы тордың суреті, Z=0 аймағының қимасы 2.9-суретте көрсетілген. Есептік аймақтың кірісі мен шығысында шекаралық шарттар белгіленді (2.10-сурет).



Сурет 2.9 – XY жазықтығындағы соңғы-көлемді тор



Сурет 2.10 – Шекаралық шарттар

Әрі қарай алынған модель Setup шешушісіне импортталады, онда турбуленттілік моделі таңдалды, шекаралық шарттардың параметрлері, шешуші әдістер орнатылды. Шекаралық шарттардың параметрлері 2.3-кестеде келтірілген.

Кесте 2.3 – Шекаралық шарттардың параметрлері

Шекаралық шарттар	
Кіре берісінде	
Түрі	Кіру жылдамдығы
Бастапқы қысым (Па)	0
Ағын жылдамдығы м/с	3, 5, 7, 10, 15
Турбулентті қарқындылық (%)	5
Турбулентті тұтқырлық коэффициенті	10
Шыға берісінде	
Түрі	Шығу қысымы
Шығу қысымы (Ра)	0
Турбулентті қарқындылықтың кері ағыны (%)	5
Турбулентті қарқындылықтың кері ағын коэффициенті (%)	10
Қалақшаның беті	
Түрі	Қабырға
Жабысу шарты	Сырғанау жоқ
Мерзімдік жағдайлар	
Түрі	Айналуы
Қалақшаның айналуы (айн/мин)	300, 500, 700

Турбуленттілік моделі. Айналмалы қалақшаның айналасындағы ауа ағынының орай ағуын модельдеу мәселесін шешу үшін Рейнольдс орташаланған Навье-Стокс (RANS) теңдеулерінің екі теңдеуі бар Realizible k-ε турбуленттілік моделі қолданылды.

«Realizible – жүзеге асырылатын» термині модель турбулентті ағындар физикасына сәйкес келетін Рейнольдс кернеуінің белгілі бір математикалық шектеулерін қанағаттандыратынын білдіреді [69]. Жүзеге асырылатын k моделінің бірден-бір артықшылығы – ол тегіс және дөңгелек ағындардың таралу жылдамдығын дәлірек болжайды. Ол сондай-ақ күшті қолайсыз қысым градиенттері, бөлу және қайта өңдеу кезінде айналу, шекаралық қабаттар ағындары үшін тамаша өнімділікті қамтамасыз етуі мүмкін.

Турбуленттік энергия теңдеуі (2.3):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \qquad (2.3)$$

Турбулентті энергияның диссипациясының меншікті жылдамдығының теңдеуі (2.4):

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho\varepsilon\left(C_1 S - C_2 \frac{\varepsilon}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}}\right) \quad (2.4)$$

Турбулентті кинетикалық энергияны өндіру формуласы төменде көрсетілген:

$$G_k = \mu_t S^2, \quad (2.5)$$

мұндағы

$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ – деформация жылдамдығының тензор модулі (2.6):

$$C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right),\ \eta = S\frac{k}{\varepsilon},\ C_2 = 1.9. \quad (2.6)$$

Турбулентті тұтқырлық коэффициенті келесідей анықталады:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.7)$$

мұндағы

$\frac{1}{\quad}$, , ;

0 ——

– бұрыштық жылдамдықпен қозғалатын координаттар жүйесіндегі айналу тензоры;

, , , ,

, , ;

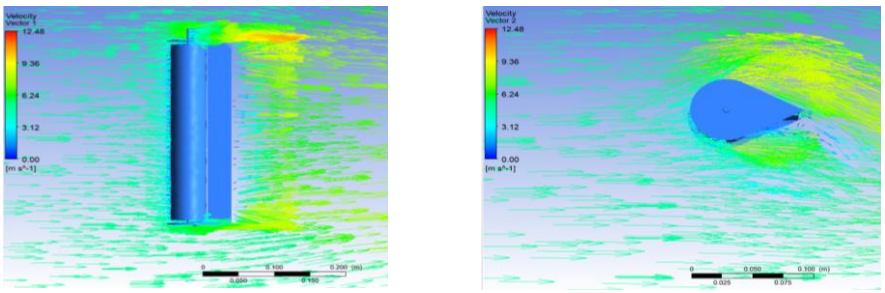
– Леви-Чивит тензорының компоненттері [70].

Прандтльдің турбулентті сандары , .

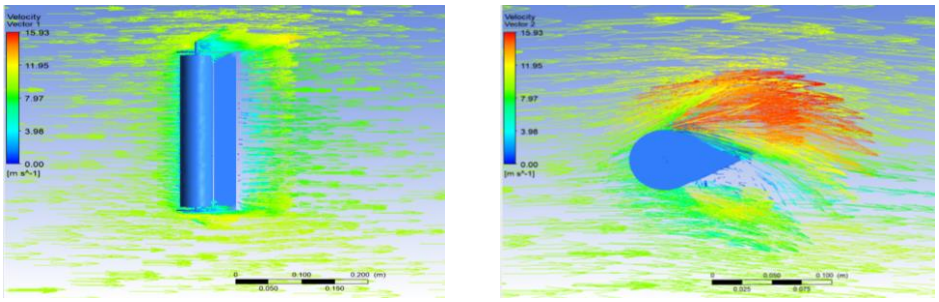
2.2 Шекаралық шарттар

Қабырғадағы турбулентті кинетикалық энергияның шекаралық шарттары келесідей беріледі:

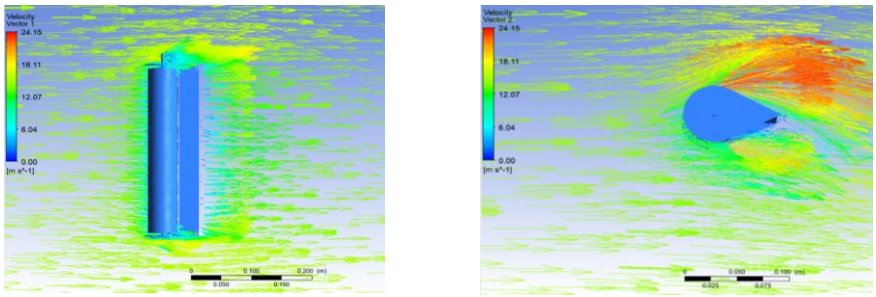
. (2.8)



а)



ә



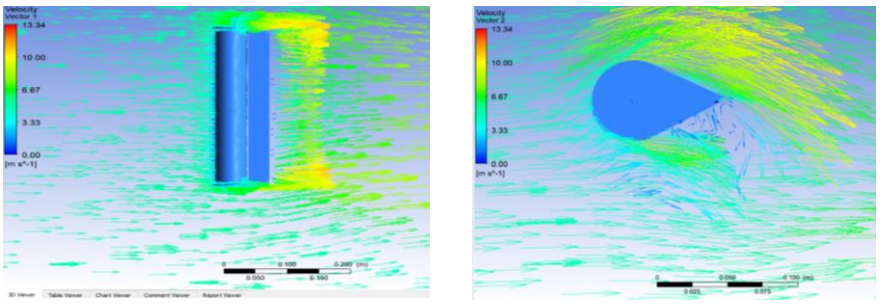
б)

а) U=5 м/с, n=300 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=300 айн/мин; б) U=15 м/с, n=300 айн/мин

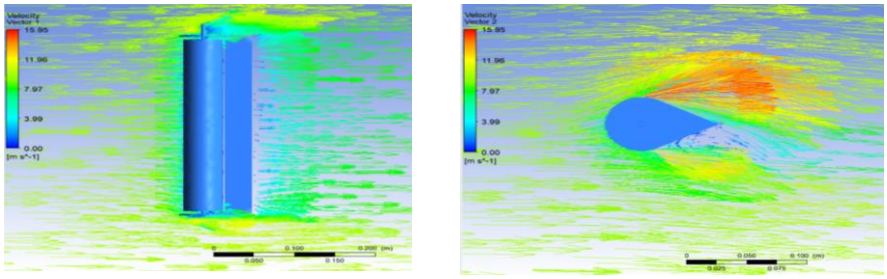
Сурет 2.12 –Қалақшаның айналасындағы жылдамдық өрісі

Ағын сызықтарының көк түсі ауа ағыны қалақшалар арқылы 5, 10 және 15 м/с жылдамдықпен өткенде, ол баяулайды және жылдамдық төмендейді дегенді білдіреді. Ағын ізінің айналасындағы ағынның үдеуі қызыл түспен көрсетілгені анық. Бұл ерекшеліктердің барлығы масса мен импульстің сақталу теориясына сәйкес келеді.

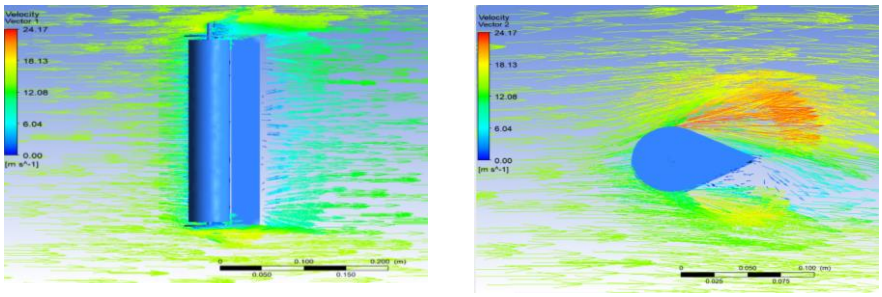
2.12 а, 2.13а және 2.14а – суреттерінен көрініп тұрғандай, 5 м/с ағын жылдамдығында қалақшаның айналу бағытына қарама-қарсы құйынды қалыптастыру байқалады, бұл кезде орта бөлшектерінің айналуының лездік бұрыштық жылдамдығы нөлге тең емес. Қалақшаның айналу жылдамдығы артқан сайын, берілген жылдамдықта құйынның қалыптасуы артады. Әрі қарай, қалақшаның артындағы құйынның түзілу қарқындылығының сөндірілуіне және айналдыруына байланысты көтеру күші мен маңдайлық кедергі күштерінің артуы байқалады.



а)



ә)



б)

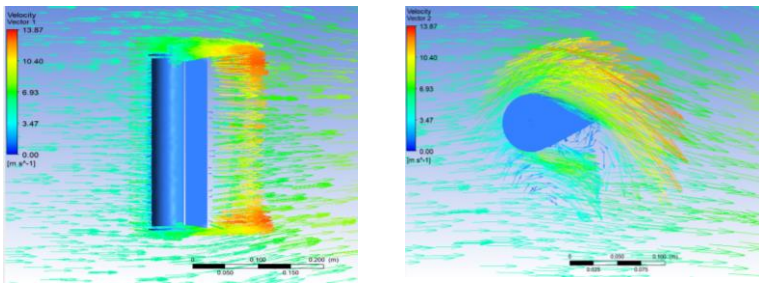
а) U=5 м/с, n=500 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=500 айн/мин; б) U=15 м/с, n=500 айн/мин

Сурет 2.13 – Қалақшаның айналасындағы жылдамдық өрісі

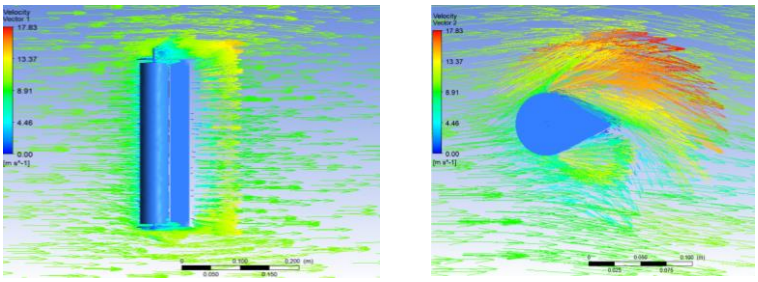
Сол жақтағы суреттегі символдар тақтасы – бұл ең аз қысым болып табылатын көк түстен қызылға дейінгі түс градациясы.

Ағынның бағыты солдан оңға қарай болды. Қалақша айналған кезде алдыңғы бет пен артқы бет арасындағы қысым айырмашылығы пайда болады. Қалақшаның цилиндрлік бетінің арқасында қысым айырмашылығы (күш) айналу моментін тудырады. Көріп отырғаныңыздай, қалақшаның алдыңғы жағы жоғары қысымға ие, ал сәйкес артқы жағы төмен қысымға ие.

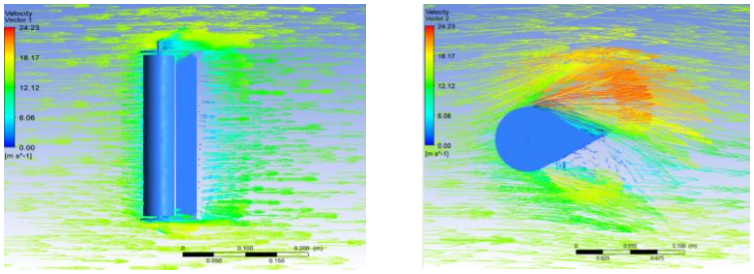
Ағын жылдамдығы мен қысым арасындағы байланысты орнататын Бернулли заңына сәйкес, жоғары статикалық қысым аймағында ауа ағынының жылдамдығы төмендейді.



а)



ә)



б)

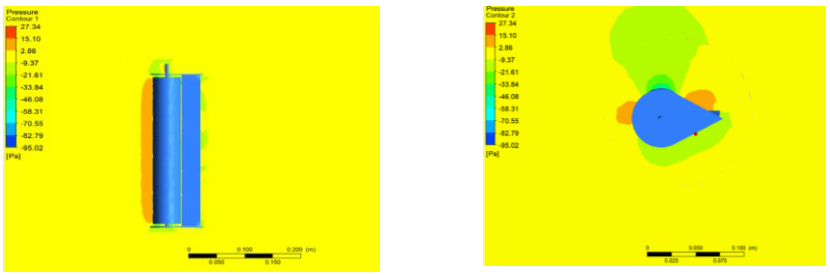
а) U=5 м/с, n=700 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=700 айн/мин; б) U=15 м/с, n=700 айн/мин

Сурет 2.14 – Қалақшаның айналасындағы жылдамдық өрісі

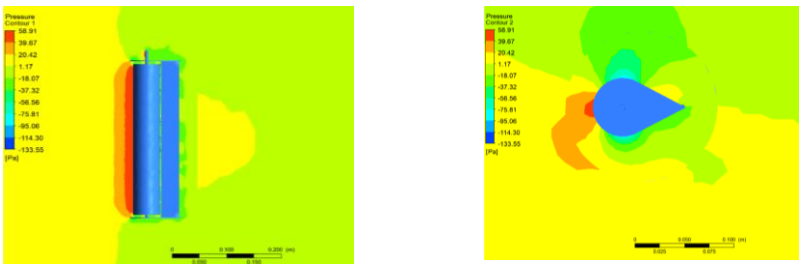
Келесі 2.15-2.17 суреттерде ЖЭҚ айналмалы қалақшасының айналасында статикалық қысымның таралу нәтижелері ($p_{ст} = p - p_{атм}$) көрсетілген. Нәтижелер ауа ағынының жылдамдығы 5, 10 және 15 м/с болғанда және қалақшаның айналу жиілігі 300, 500 және 700 айн/мин болғанда алынады.

Осыған сүйене отырып, жасыл түспен көрсетілген жерлерде статикалық қысымның төмен мәні кезінде көтеру (Магнус күші) күші пайда болады. Магнус эффектісіне сәйкес, цилиндрлік дененің бетінде ауа ағынымен ағып жатқан кезде пайда болатын көтеру күші ағынның бағытына перпендикуляр бағытталған [72, 73].

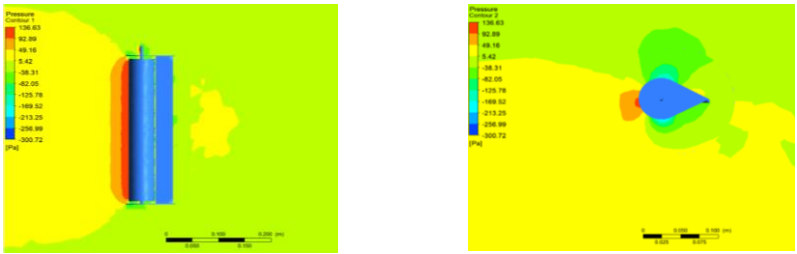
5 м/с жылдамдықта қысым мәні салыстырмалы түрде өзгеріссіз қалады және айналу жиілігінің өсуі шамалы әсер етеді. 300 айн/мин жиіліктегі айналу кезінде қысымның өзгеру диапазоны -95,02 Па-дан 37,34 Па-ға дейін, 500 айн/мин кезде -99,31 Па-дан 30,46 Па-ға дейін және 700 айн/мин кезде 107,78 Па-дан 36,70 Па-ға дейін болады.



а)



ә)



б)

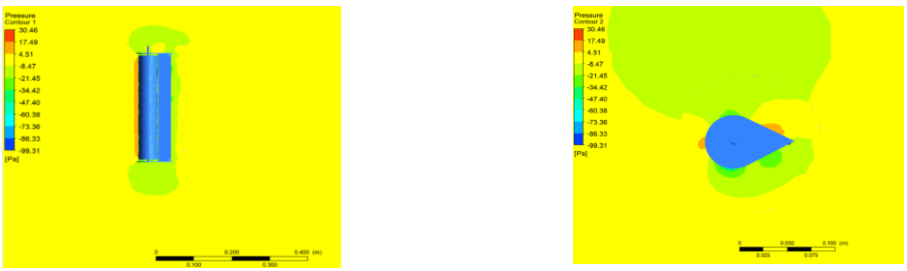
а) U=5 м/с, n=300 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=300 айн/мин; б) U=15 м/с, n=300 айн/мин

Сурет 2.15 – Қалақшаның айналасындағы қысымның таралу өрісі

Ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен қысымның өзгеруінің диапазоны кеңейеді. Сонымен, ағынның жылдамдығы 10 м/с кезінде және айналу жиілігі 300 айн/мин кезінде -133,55 Па-дан 58,91 Па-ға дейін, ал 500 айн/мин кезде -128,01 Па-дан 60,60 Па-ға дейін және 700 айн/мин кезде -133,68 Па-дан 61,83 Па-ға дейін аралықта болды. Айналмалы қозғалысқа байланысты қалақшаның ұштарында қысым өрісінің өзгеруі байқалады.

Суреттерден көрініп тұрғандай, максималды қысым қалақшаның жел жағында байқалады, сол уақытта минималды қысым жел жоқ жағында шоғырланған.

Ағынның максималды берілген жылдамдығы 15 м/с болғанда, статикалық қысымның өзгеруінің келесі нәтижелері алынды: 300 айн/мин кезде -300,72 Па 136,63 Па дейін, 500 айн/мин кезінде -310,52 Па 137,91 Па дейін және 700 айн/мин кезінде -316,54 Па 138,47 Па дейін.



а)

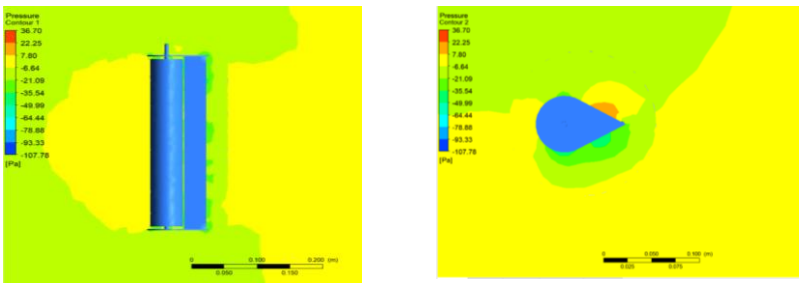
ә)

б)

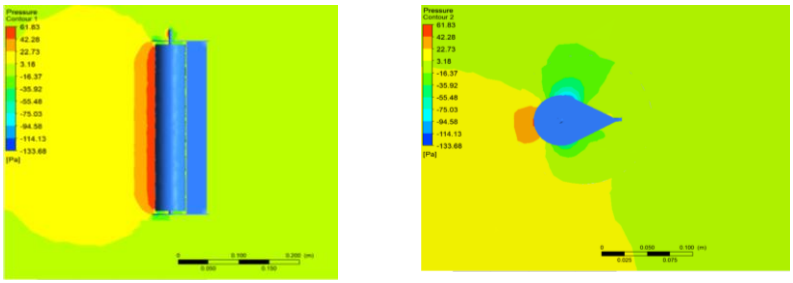
а) U=5 м/с, n=500 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=500 айн/мин; б) U=15 м/с, n=500 айн/мин

Сурет 2.16 – Қалақшаның айналасындағы қысымның таралу өрісі

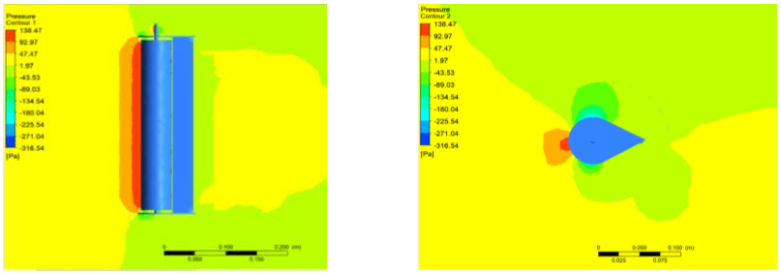
Цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның оңтайлы орналасу бұрышын анықтау үшін сандық модельдеу жүргізілді. Алдын ала модельдеу ANSYS WORKBENCH бағдарламасын қолдану арқылы жүргізілді. 3D КОМПАС бағдарламасын қолдана отырып, 0, 15, 30, 45 және 60 градус бұрыштары бар қалақшалардың 5 нұсқасының геометриясын модельдеу орындалды. Құрамалы қалақша цилиндрге қатысты 30 градус бұрышта орналасқанда, көтеру күші коэффициентінің максималды мәні және маңдайлық кедергінің минималды мәні алынатыны анықталды: сәйкесінше 0,54 және 0,29. Осыған сүйене отырып, одан әрі есептеулер цилиндрге қатысты 30 градус бұрышта орналасқан қозғалмайтын қалақшасы бар модельді қолданды.



а)



ә)



б)

а) U=5 м/с, n=700 айн/мин; ә) U=10 м/с, n=700 айн/мин; б) U=15 м/с, n=700 айн/мин

Сурет 2.17 – Қалақшаның айналасындағы қысымның таралу өрісі

Design Modeler бағдарламасының препроцессорын қолдана отырып, одан әрі есептеу үшін қалақша профилінің үш өлшемді моделі жасалды. Құрамалы қалақша цилиндрден және екі жағынан негізге тамшы тәрізді диск түрінде бекітілген қозғалмайтын қалақшадан тұрады. Зерттелетін модельдің айналасында шекаралық шарттарды белгілеу үшін айналу шарттарын белгілеуге арналған цилиндрлік ішкі аймақ жасалады. Аэродинамикалық құбырды имитациялау үшін параллелепипед цилиндрлік ішкі аймақтың айналасында жасалады.

Ansys Meshing кіші бағдарламасында модельді соңғы-элементтік торларға бөлу операциясы жүргізілді. Ең аз уақыт ресурстары жұмсалған оңтайлы торды анықтау үшін әртүрлі ұяшықтар саны бар 3 тор опциялары салыстырылды. 248723 ұяшықтар саны бар тор таңдалды, ол 9 м/с кезде көтеру күші коэффициентінің дәл нәтижелерін көрсетті. Есептелген тор тетрагональды ұяшықтардан тұрады. Рейнольдс бойынша орташаланған Навье-Стокс (RANS)

теңдеулерінің екі теңдеуімен турбуленттілік моделі ретінде Realizible k-ε таңдалды. Ең дәл баптау үшін жылдамдық пен қысым өрісі, сондай-ақ ұқсастықты жақсарту үшін SIMPLE алгоритмі қолданылды.

Сандық модельдеу барысында ауа жылдамдығы 5, 10, 15 м/с кезінде және айналу жиілігі 300, 500, 700 айн/мин болған кезде қалақшаның айналасындағы ауа ағынының үш өлшемді суреттері және қысым өрісінің таралуы алынды. Үш өлшемді орай ағу бейнесі модельдің айналасында жүретін барлық физика-аэродинамикалық процеске түсініктеме береді. Алынған нәтижелерден құрамалы қалақша тиімді қысым мәнін беретіні анықталды. Алынған сандық нәтижелер құрамалы қалақшалы жел турбинасының моделін жасау кезінде пайдалы болады.

2.4 Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының үш өлшемді моделін құру

Жел энергетикалық қондырғысының моделі қозғалмайтын қалақшалар мен цилиндрлер түрінде жасалған құрамалы қалақшалардан, оған жұмыс күшінің элементтері бекітілген орталық біліктен, сондай-ақ негізгі білік бекітілген діңгектен тұрады.

Математикалық модельдің геометриялық өлшемдері 2.4-кестеде келтірілген.

Кесте 2.4 – Жел энергетикалық қондырғының моделінің геометриялық өлшемдері

Параметрлер	Мәндері
Цилиндрдің ұзындығы	205 мм
Цилиндрдің диаметрі	50 мм
Қозғалмайтын қалақшаның ұзындығы	225 мм
Қозғалмайтын қалақшаның ені	25 мм
Жел доңғалағының диаметрі	500 мм
Діңгек ұзындығы	420 мм

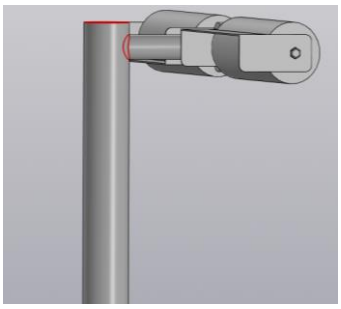
Қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышының бүкіл жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларына әсерін зерттеу үшін қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі орналасуы бар математикалық модельдер жасалды.

2.18-суретте цилиндрдің айналу осінің қашықтығына қатысты қозғалмайтын қалақшаның бұрышты қалай құрайтыны көрсетілген (0°, 15°, 30°, 45°, 60°).

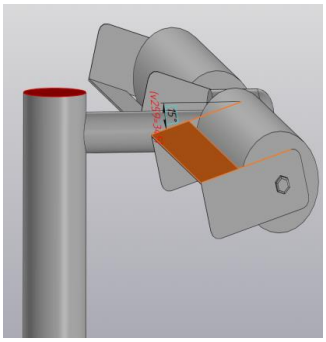
Математикалық модельдеудің бастапқы кезеңі – шекаралық шарттар мен айналу шарттарын белгілеу үшін математикалық модельдің айналасында есептеу аймақтарын құру болып табылады.

Қалақшалардың айналу шарттарын белгілеу үшін әрбір күш элементінің айналасында қалыңдығы 5 мм цилиндрлік ішкі аймақ (1) құрылды, цилиндрлік ішкі аймақтардың айналасында 0,1 м радиустары бар z осінің маңында цилиндрлік ішкі аймақ (2), сондай-ақ бүкіл жел доңғалағының шарттарын

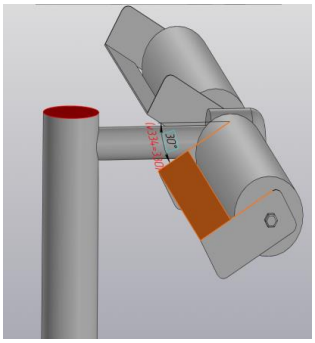
айналдыру үшін цилиндрлік қосалқы аймақтың (2) (2.19-сурет) айналасында 0,7 м; 0,7 м; 1,5 м; 0,7 м ;0,7 м; 3м өлшемдерімен параллелепипед түріндегі аймақ (3) құрылды.



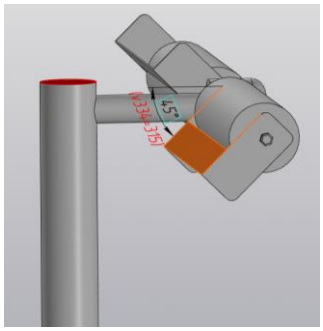
а)



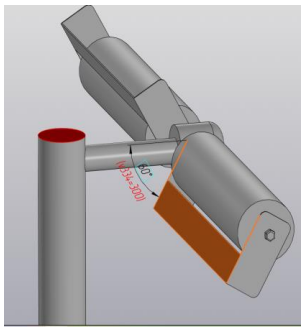
ә)



б)



в)

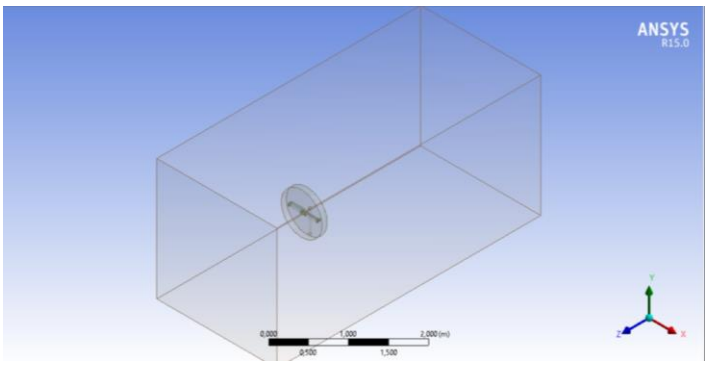


г)

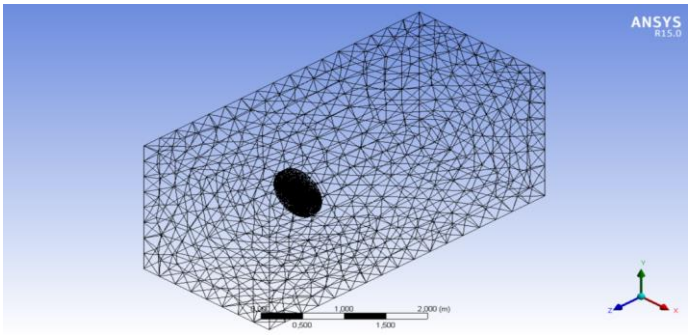
а) 0 градус; ә) 15 градус; б) 30 градус; в) 45градус; г) 60 градус

Сурет 2.18 – Қалақшалардың әртүрлі бұрыштарда орналасуы

2.20-суретте ANSYS Meshing кіші бағдарламасында алынған ЖЭҚ-тің соңғы-көлемді торы көрсетілген. Тор тетраэдрлерден тұрады, олардың саны 269842.

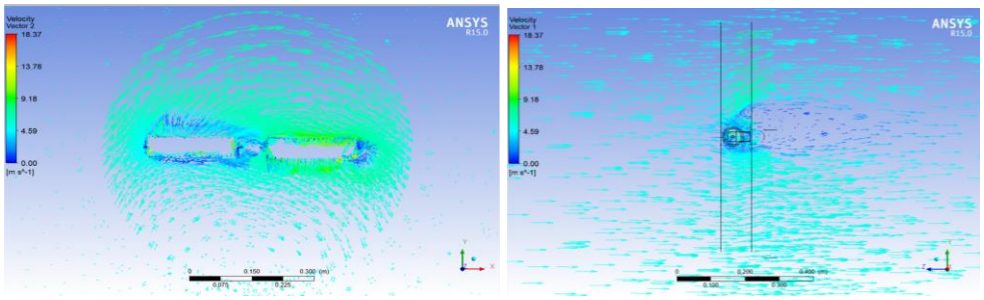


Сурет 2.19 – Есептеу аймақтары бар жел энергетикалық қондырғысының моделі

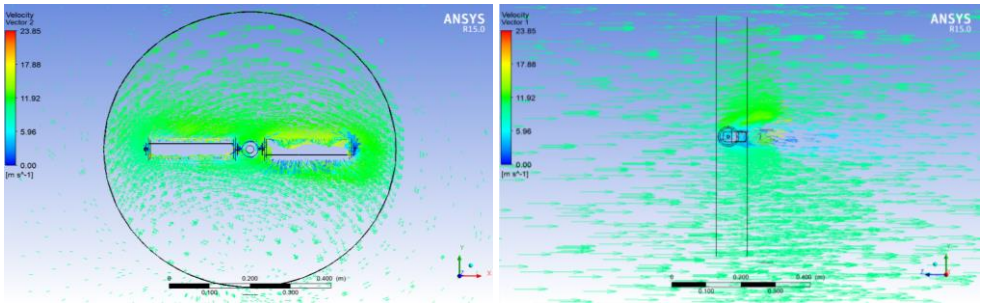


Сурет 2.20 – Соңғы-көлемді тор

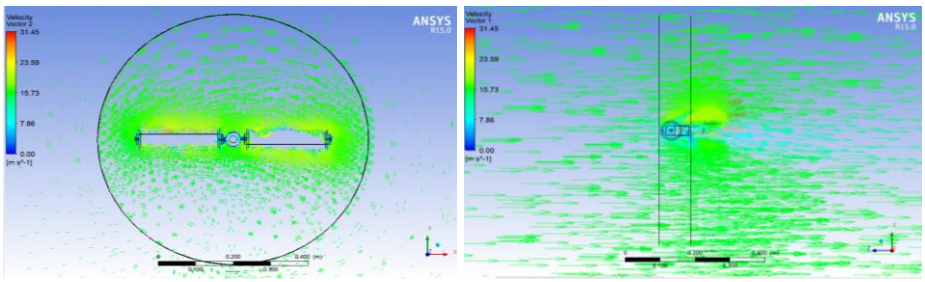
2.21-суретте n=300 айн/мин және желдің әртүрлі жылдамдықтары кезінде екі қалақшалы айналмалы жел доңғалағының айналу суреттері көрсетілген.



а)



ә)



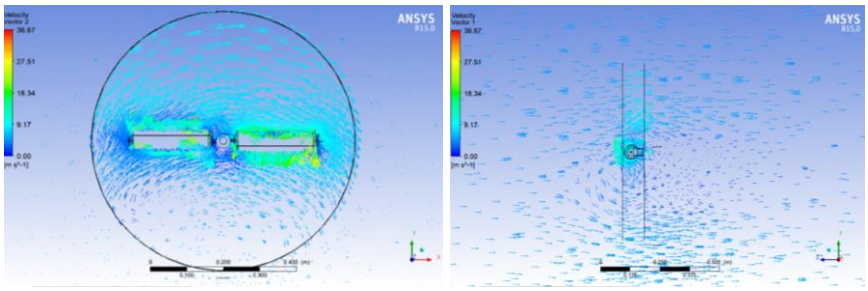
б)

а) U=5 м/с;ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с.

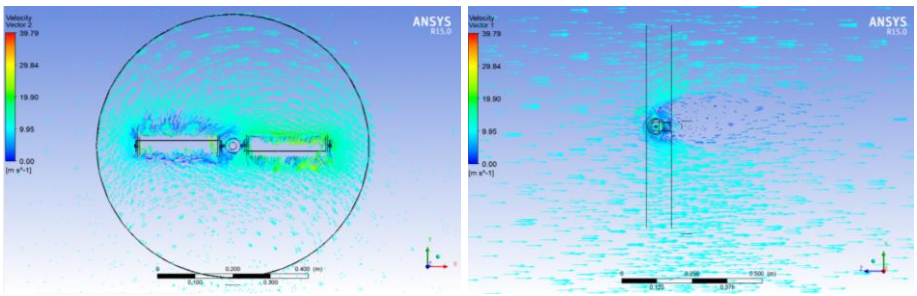
Сурет 2.21 – n=300 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғыны ауа ағыны орай ағуының бейнесі

2.21-суреттен көріп отырғаныңыздай, жоғарғы сол жақ бұрышта шартты белгілер тақтасы болып табылатын көк (минимум) - қызыл (максимум) түс градациясы орналасқан. Жел доңғалағы z осінің айналасында айналады. Жел доңғалағының айналу бағыты сағат тілімен беріледі. Жел доңғалағына ауа ағыны әсер еткенде, қалақшаларда жел доңғалағын айналдыратын аэродинамикалық күштер пайда болады. Жел доңғалағының орталық білігінің артында құйын пайда болатыны анықталды. Жел доңғалағына жақындаған сайын ағындағы ауа қысымы көтеріледі, бірақ жел доңғалағы арқылы өткенде күрт төмендейді. Жел доңғалағының артында кейбір сиреу пайда болады, ол кейіннен біртіндеп жоғалады.

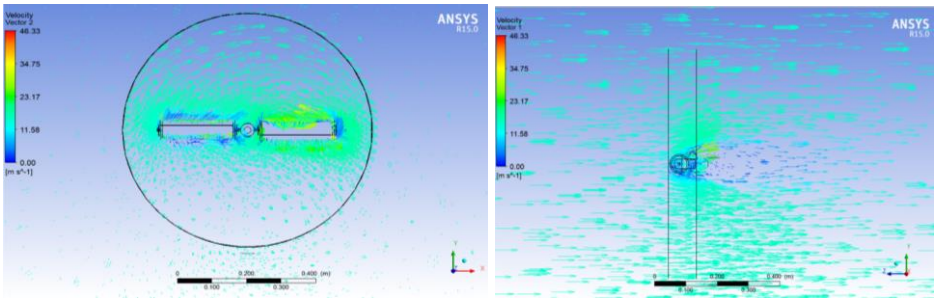
Төменде 2.22-суретте n=700 айн/мин жел энергетикалық қондырғының орай ағу суреттері көрсетілген.



а)



ә)



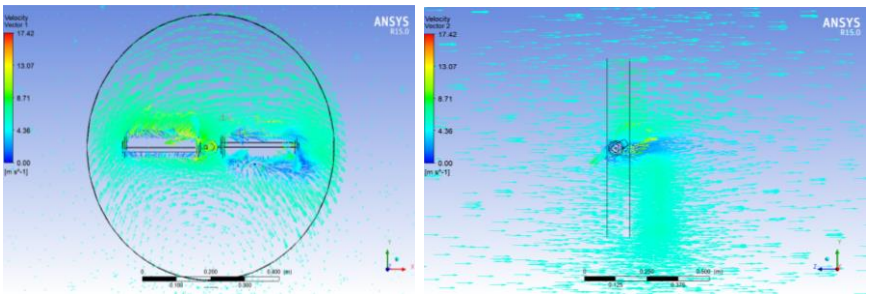
б)

а) U=5 м/с; б) U=10 м/с; в) U=15 м/с

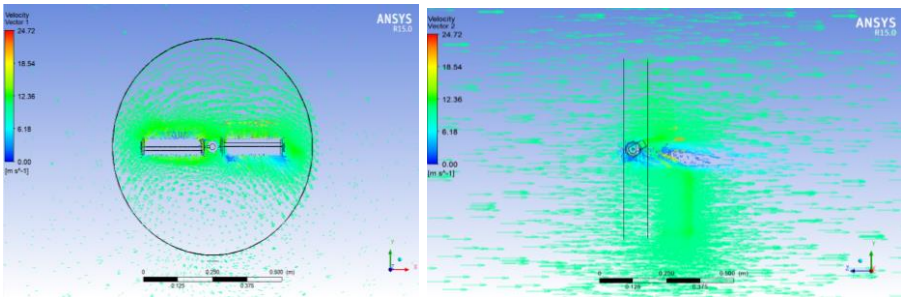
Сурет 2.22 – n=700 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғысын ауа ағыны орай ағуының бейнесі

2.22-суреттерден көріп отырғанымыздай, қалақшалар мен жел доңғалақтарының үлкен айналымдарымен жел доңғалағының орталық бөлігінің артындағы құйын осы жылдамдықпен күшейетіні байқалады. Ауа ағынының бағыты z осі бойынша солдан оңға бағытталған.

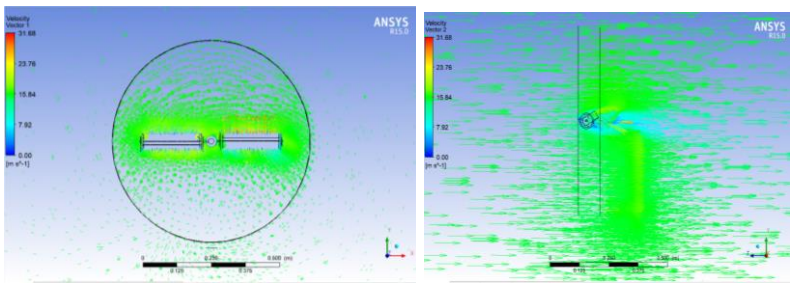
Төменде 2.23 және 2.24-суреттерде n=300 айн/мин және 700 айн/мин кезінде 30 градус бұрышта қозғалмайтын қалақшасы бар ЖЭҚ модельдеу нәтижелері келтірілген.



а)



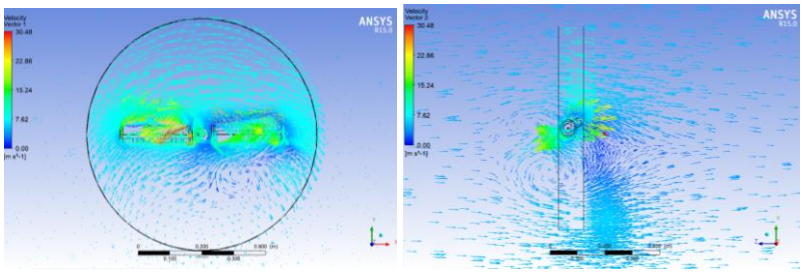
ә)



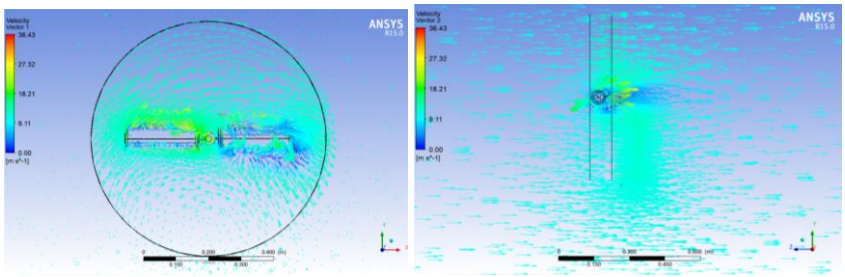
б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

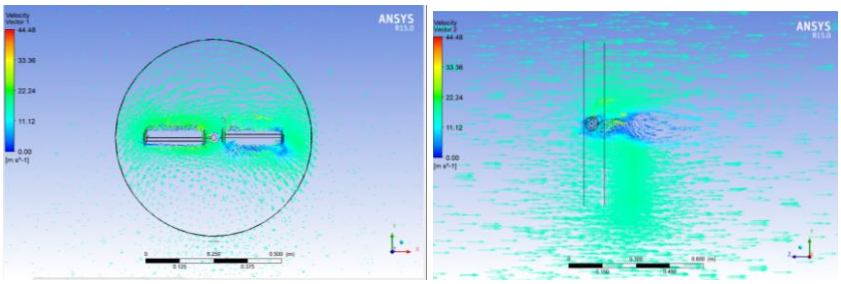
Сурет 2.23 – n=300 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғысын ауа ағыны орап ағуының суреті



а)



ә)



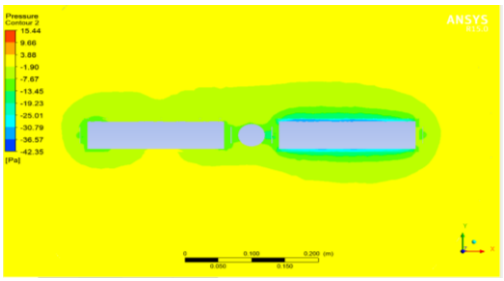
б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

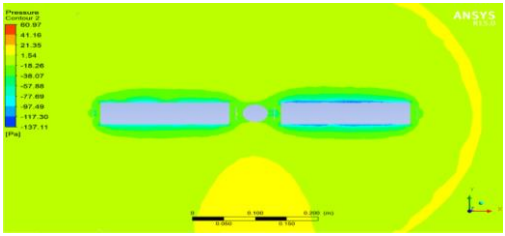
Сурет 2.24 – n=700 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғысын ауа ағыны орай ағуының бейнесі

2.23 және 2.24-суреттерден көріп отырғаныңыздай, қозғалмайтын қалақша 30 градус бұрышта орналасқан кезде ағынның бұзылуы орын алады, бұл қалақшалар мен жел доңғалағының максималды айналымдары кезінде айқын көрінеді. Мұндай бұзылудың себебі қолайсыз қысым градиентінде оның тежелуінен туындаған шекаралық қабаттың бөлінуі болып табылады.

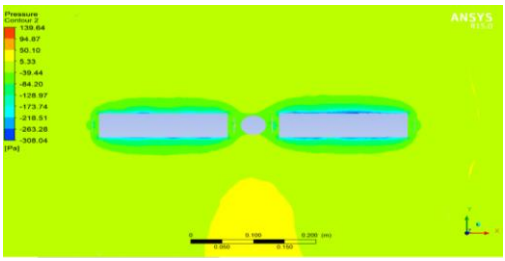
Төменде 2.25-2.26 суреттерде 0 және 30 градус қозғалмайтын қалақшаның орналасу бұрышында айналмалы жел доңғалағының айналасындағы қысымның таралу суреттері келтірілген.



а)



ә)

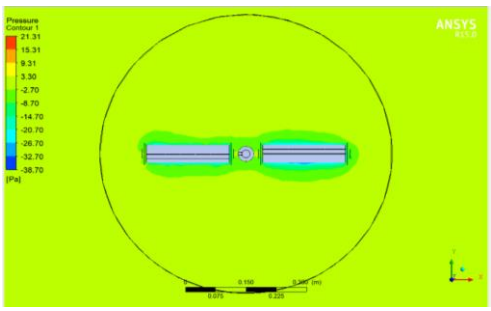


б)

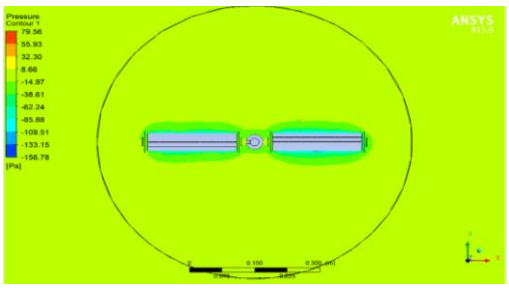
а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет 2.25 – 0 градус кезінде қозғалмайтын қалақшалы айналмалы жел доңғалағының айналасындағы қысымның таралуы

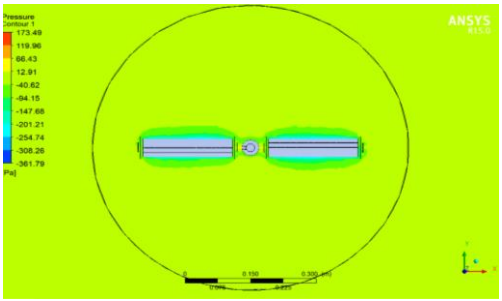
2.25-суреттерден көріп отырғанымыздай, айналмалы жел доңғалағының айналасында пайда болатын қысым диапазоны -308,04 Па-дан 139,64 Па-ға дейін, n=500 айн/мин максималды айналу режимдерінде болды.



а)



ә)



б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет.2.26 – n=500 айн/мин кезінде 30 градуспен қозғалмайтын қалақшалы айналмалы жел доңғалағының айналасындағы қысымның таралуы

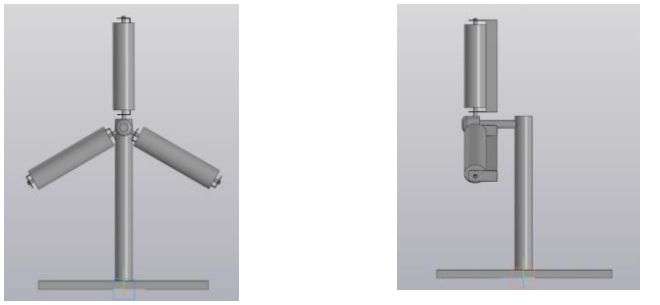
2.26-суреттерден көріп отырғанымыздай, ағынның минималды жылдамдығымен және қалақшалардың айналу жиілігі кезінде (n=500 айн/мин және u=5 м/с) 30 градустағы қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы жел доңғалағының айналасындағы қысымның мәні -38.48 Па-дан 21.30 Па-ға дейін өзгерді. Қолайсыз қысым градиентіне байланысты жел доңғалағының тежелуінен туындаған шекаралық қабаттың бөлінуі орын алады.

Болашақта жел доңғалағынан кейін құйынның қарқындылығын сөндіру мен айналдыру арқылы көтеру күші мен маңдайлық кедергі күшінің өсуі байқалады. Жел доңғалағының артындағы қарқындылықтың төмендеуіне байланысты айналу моменті артады, бұл күште ЖЭҚ көтеру күші де артады.

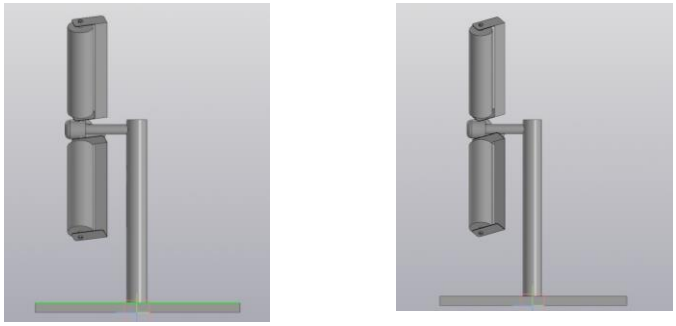
Құрамалы қалақшаның айналуынан туындайтын турбулентті ағындардың қарама-қайшылықтары болғандықтан, ЖЭҚ-дің көтергіш күші күрт төмендейді. Көтеру күшінің төмендеуі ЖЭҚ жұмысының тиімділігінің төмендеуіне әкеледі. Осыған сүйене отырып, қозғалмайтын қалақшаның қолайлы бұрышы екі қалақшалы ЖЭҚ үшін 30 градус бұрыш болып табылады.

2.5 Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының үш өлшемді моделін құру

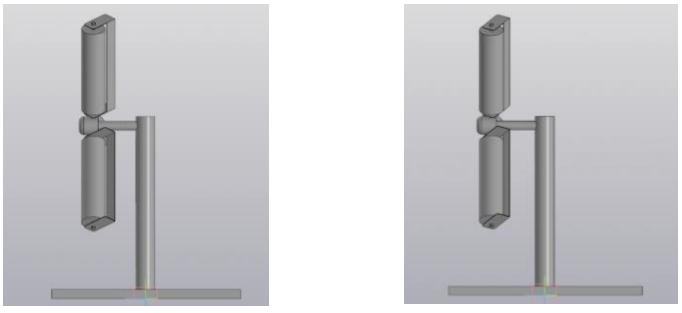
Сандық зерттеу мақсатында үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының айналасында Designmodeler КОМПАС 3D бағдарламасын қолдана отырып геометриялық модель жасалды (2.27-сурет).



а)



ә) б)



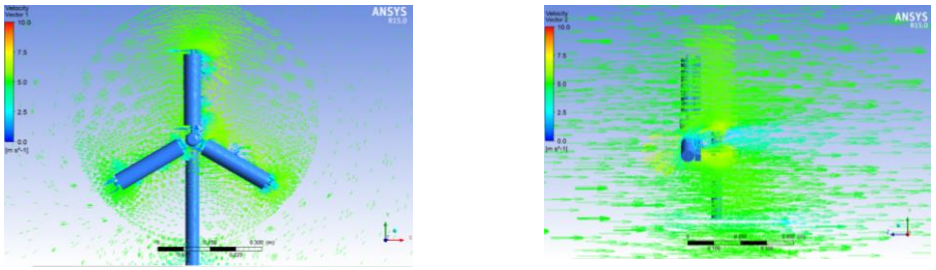
в) г)

а) 0 градус; ә) 15 градус; б) 30 градус; в) 45 градус; г) 60 градус

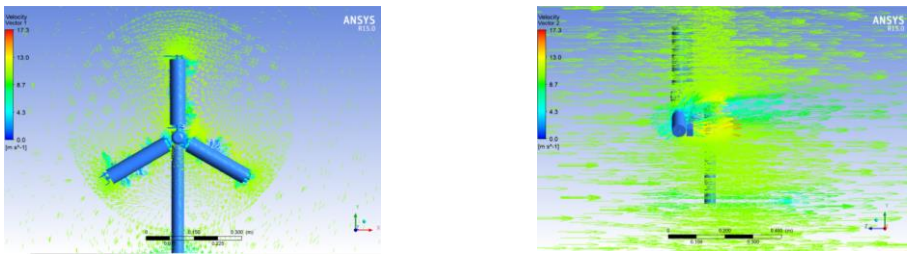
Сурет 2.27 – Қозғалмайтын қалақшаның орналасуының әртүрлі бұрыштары бар үш қалақшалы ЖЭҚ геометриялық модельдері

Қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышының жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларына әсерін зерттеу үшін қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі орналасуы бар (0°, 15°, 30°, 45°, 60°) математикалық модельдер жасалды.

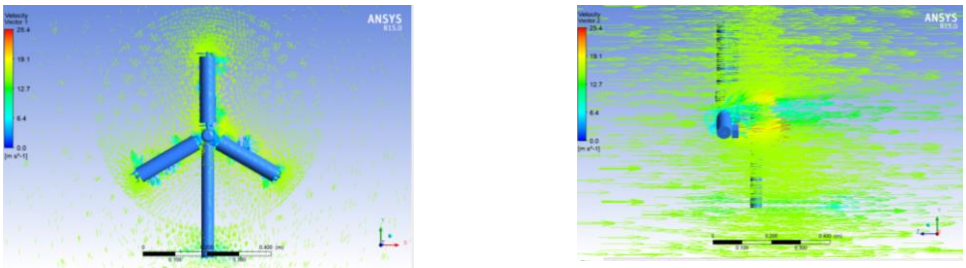
Төменде 2.28-2.29 суреттерде n=300 және 700 айн/мин және U=5, 10 және 15 м/с кезінде 30 градус бұрышпен қозғалмайтын қалақшасы бар үш қалақшалы жел доңғалағын ауа ағыны орай ағу бейнесінің нәтижелері келтірілген.



а)



ә)



б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

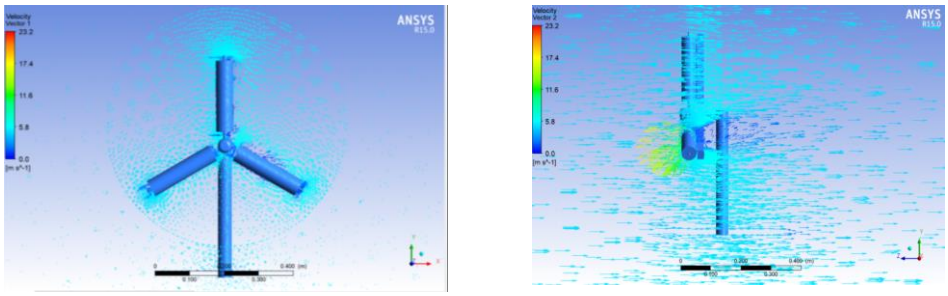
Сурет 2.28 – n=300 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғысын ауа ағыны орай ағу бейнесі

Негізгі болжамдар:

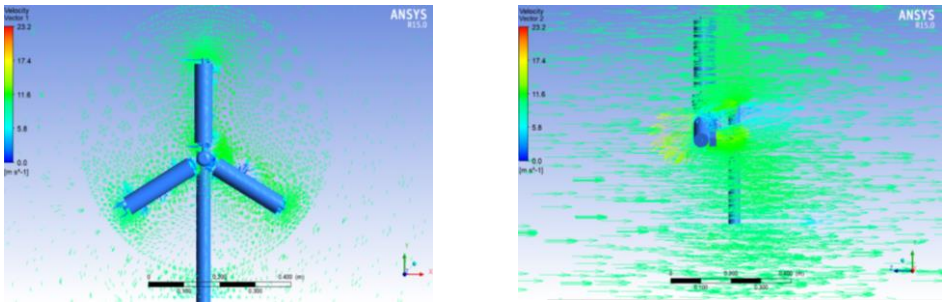
1. Мах сандарының төмен мәндеріне байланысты (газ жылдамдығының жергілікті дыбыс жылдамдығына қатынасы, M<<0.1) ауа ағыны сығылмайтын орта үшін әділ теңдеулермен сипатталады.

2. Рейнольдстың үлкен сандарына байланысты (инерциялық күштердің тұтқырлық күштеріне қатынасы, $Re>10^4$) ағын турбулентті болады.

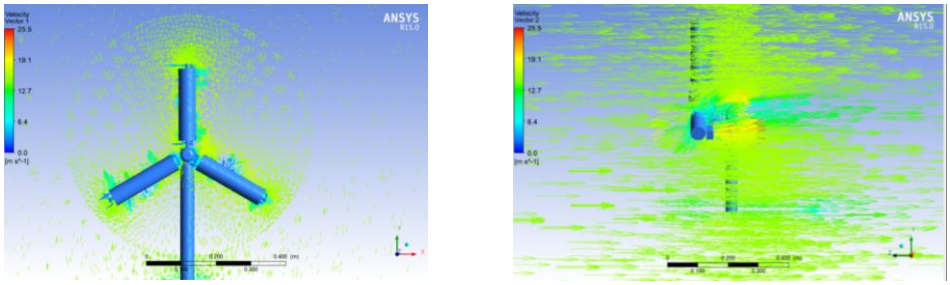
3. Мах сандарының төмен мәндеріне және жел доңғалағының маңындағы температураның шамалы өзгеруіне байланысты ағын изотермиялық болып табылады.



а)



ә)



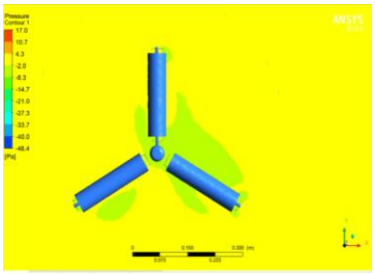
б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

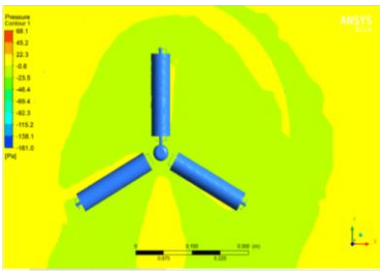
Сурет 2.29 – n=700 айн/мин кезінде жел энергетикалық қондырғысын ауа ағыны орай ағу бейнесі

Көріп отырғаныңыздай, алынған нәтижелерден (2.28 және 2.29-суреттер) төмен жылдамдықта үш жазықтыққа қатысты жылдамдық өрісі симметриялы болып қалады, бірақ ауа ағынының жылдамдығының өсуімен айналмалы қалақшалардың артында жел доңғалағының турбулентті ізін қалыптастыру арқылы құйындардың пайда болуы байқалады. Мұның физикалық түсіндірмесі-турбулентті құйындар орташа жылдамдықтың үлкен градиенттеріне байланысты турбуленттіліктің кинетикалық энергиясын құру арқылы артады.

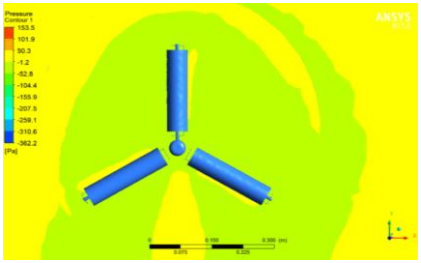
2.30-суретте n=500 айн/мин және U=5, 10, 15 м/с кезінде жел доңғалағының айналасындағы қысымның таралуы көрсетілген.



а)



ә)



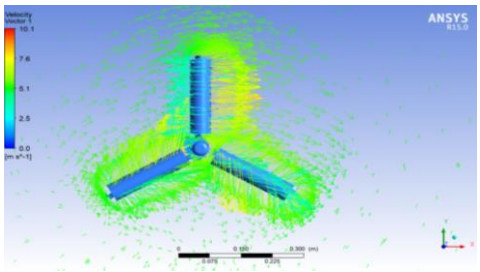
б)

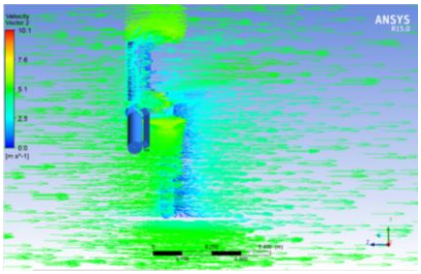
а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет 2.30 – Қозғалмайтын қалақша 30 градус бұрышта және n=500 айн/мин болғанда қысымның таралу бейнесі

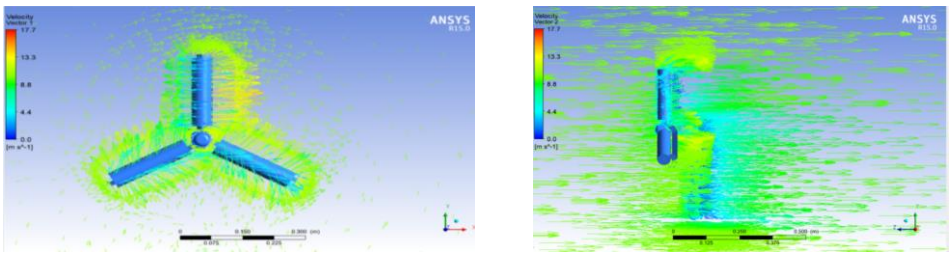
2.30-суреттен көріп отырғанымыздай, төмен қысымды аймақ қалақшаның жел асты жағы бетінен жоғары тармақталады, ал жоғары қысымды аймақ қалақшаның жел жағынан ағынның жергілікті үдеуіне дейін тармақталады. Турбулентті құйындардың пайда болуы нәтижесінде төмен қысымды аймақ пайда болады.

Төменде 2.31-2.32 суреттерде әртүрлі айналу режимдерінде 30 градус бұрышта қозғалмайтын қалақшасы бар жел доңғалағын математикалық модельдеу нәтижелері келтірілген.

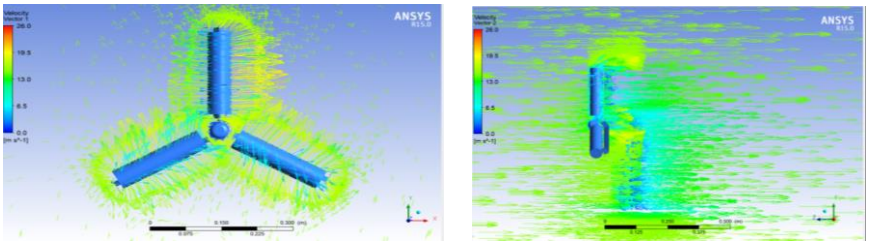




а)



ә)

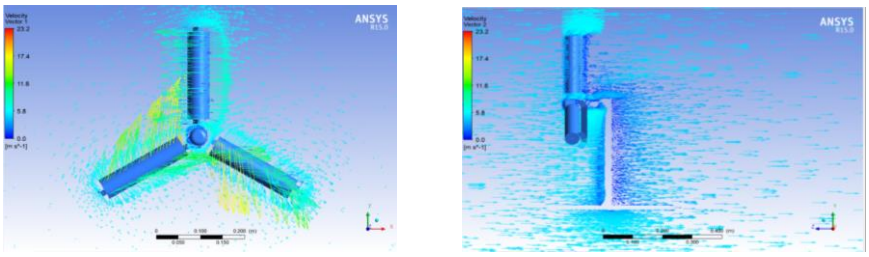


б)

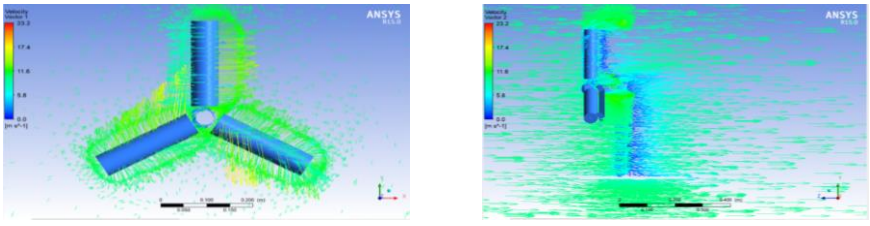
а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет 2.31 – Қозғалмайтын қалақша 30 градус бұрышта орналасқанда n=300 айн/мин кезінде айналмалы жел доңғалағының айналасындағы жылдамдық өрісі

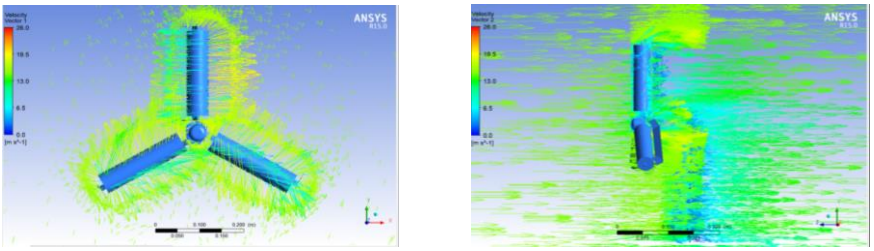
Қозғалмайтын қалақшаның орналасу бұрышының ұлғаюымен 2.31-2.32 суреттерінен көріп отырғанымыздай, қалақшалардың бүкіл жел асты жағы мен ұштары үзілген орай ағу аймағында болады, бұл жел доңғалағының тежелуі және толық айналымда тартылудың мерзімінен бұрын жоғалуы түрінде көрінеді.



а)



ә)

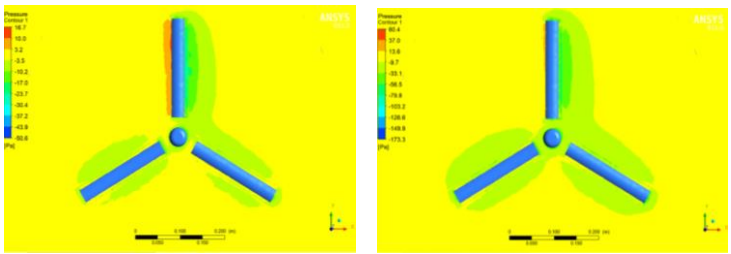


б)

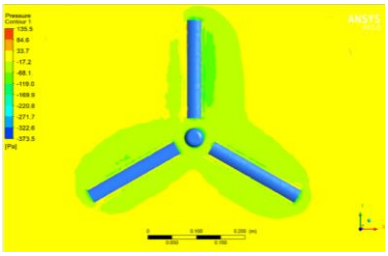
а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет 2.32 – Қозғалмайтын қалақша 30 градус бұрышта орналасқанда n=700 айн/мин кезінде айналмалы жел доңғалағының айналасындағы жылдамдық өрісі

Профильдің тұрақты емес қозғалысы кезінде қозғалмайтын қалақшаның орналасу бұрышының өсуімен және жел доңғалағына аэродинамикалық жүктемелердің айтарлықтай өсуіне әкелетін күшті құйынды ағынның пайда болуымен жүзеге асырылатын құбылыстардың күрделі жиынтығы орын алады. 2.33-суретте қалақшалардың ұштарындағы ағынның бұзылуының физикалық себебі көрсетілген, ол шекаралық қабаты бар профиль хордасы бойынша оң қысым градиентінің нәтижесінде пайда болады. Қозғалмайтын қалақшаның орналасуының өсуі осы өзара әрекеттесуді анықтайды.



а) ә)



б)

а) U=5 м/с; ә) U=10 м/с; б) U=15 м/с

Сурет 2.33 – Қозғалмайтын қалақша 30 градус бұрышта орналасқанда n=500 айн/мин кезінде айналмалы жел доңғалағының айналасындағы жылдамдық өрісі

Ауа айналмалы жел доңғалағы арқылы өткенде, инерция моменті төмендейді, осылайша желдің жылдамдығы жел доңғалағы роторынан төмен түсетін жергілікті тұтқыр аймақты құрайды. Жел турбинасындағы бұл аймақ кеңістіктік диапазондағы құйындардың реттелген компоненттерін және байланысты құйындарын қамтитын үздіксіз ауқымды масштабты турбулентті когерентті құрылым болып табылатын із ретінде белгілі. Ағын өрісінің деформациясы цилиндрдің бір жағындағы ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауына және цилиндрлердің өз осьтерінің айналасында оң бағытта (сағат тіліне қарсы) айналуынан туындаған екінші жағындағы ағын жылдамдығының төмендеуіне байланысты [74, 75].

2.6 Көлденең айналу осіне арналған жел энергетикалық қондырғыларының аэродинамикалық сипаттамаларын математикалық есептеу

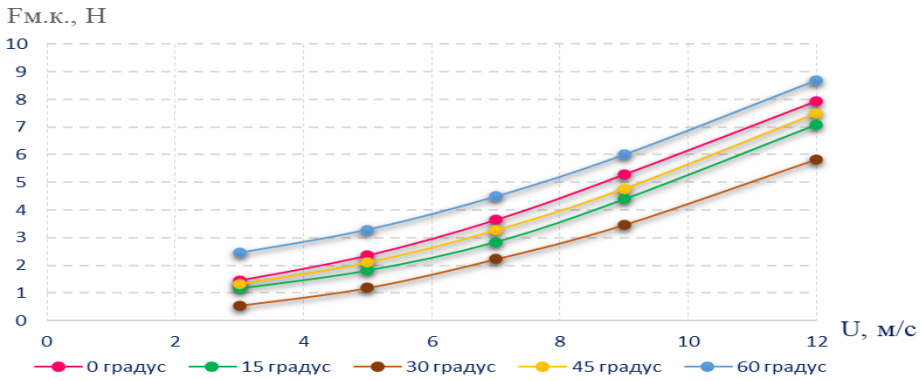
Бұл бөлімде барлық құрамалы қалақшалардың маңдайлық кедергі күшінің, бір қалақшаға әсер ететін көтеру күшінің, жел доңғалағына әсер ететін күш моментінің, сондай-ақ қозғалмалы жел доңғалағы үшін алынған бір қалақшаның кедергі коэффициенті мен көтеру күші коэффициентінің уақыт бойынша орташа мәндері келтірілген.

Уақыт бойынша орташа мәнін анықтау формула бойынша орындалды:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,dt\,.$$

Орташа T уақыт аралығының мәні 3 с-тан 5 с-қа дейін таңдалды, бұл 0.02 с өз осінің айналасындағы цилиндрлердің айналу кезеңінен 300 айн/мин ең төменгі айналу жылдамдығымен әлдеқайда көп.

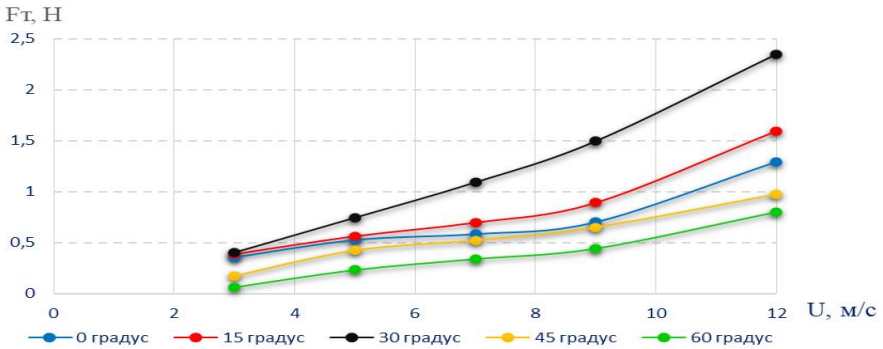
Төменде желдің жылдамдығына және екі қалақшалы ЖЭҚ үшін қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышына байланысты математикалық модельдеу кезінде алынған нәтижелері келтірілген (2.34-2.38 суреттер).



Сурет 2.34 – Екі қалақшалы ЖЭҚ үшін қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі көлбеу бұрышына байланысты ауа ағынының жылдамдығына маңдайлық кедергі күшінің тәуелділігі

2.34-суреттен маңдайлық кедергі күші ағын жылдамдығының мәнінің жоғарылауымен, сондай-ақ қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышының жоғарылауымен монотонды түрде өсетіні анықталды. Көлбеу бұрышының әрбір өсуімен маңдайлық кедергі күшінің өсу қадамы шамамен 0,6-1.13 Н құрайды. Орналасудың 30° бұрышында макет минималды маңдайлық кедергі мен максималды көтеру күшіне ие екендігі анықталды.

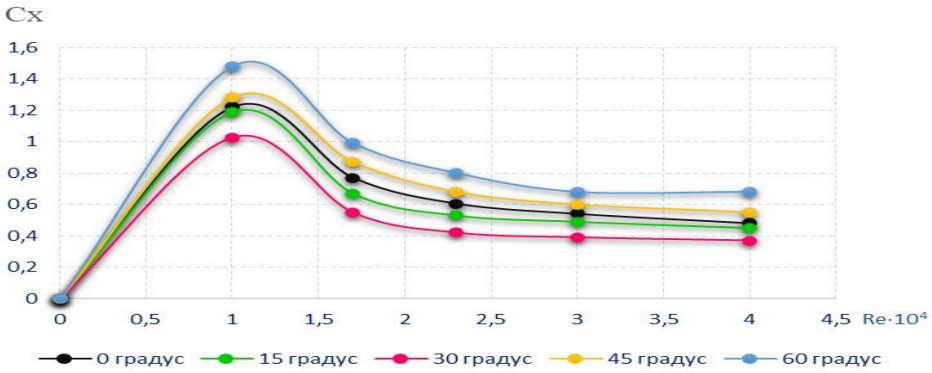
Төменде 2.35-суретте макеттің ауа ағынының жылдамдығына тарту күшінің тәуелділігінің нәтижесі ұсынылған.



Сурет 2.35 – Қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі көлбеу бұрышына кезінде ауа ағынының жылдамдығына тарту күшінің тәуелділігі

2.35-суреттен көрініп тұрғандай, 12 м/с кезіндегі 2,35 Н тарту күшінің максималды мәні цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақша 30° бұрышта орналасқан кезде алынды. Ары қарай желдің жылдамдығы 12 м/с болғанда және 60°бұрышта 0.8 Н тарту күшінің күрт төмендеуі байқалады.

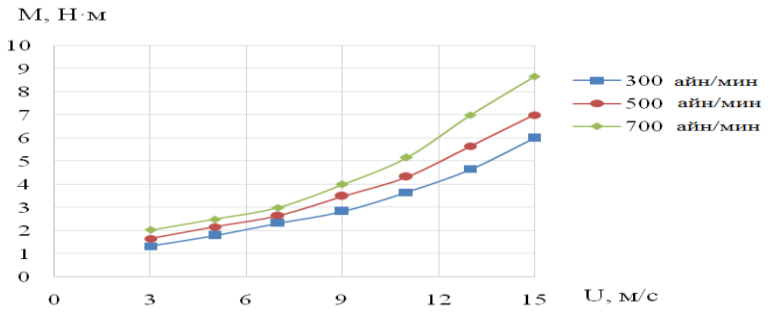
2.36-2.38 суреттерде Рейнольдс санына тәуелді есептелген аэродинамикалық коэффициенттердің нәтижелері келтірілген.



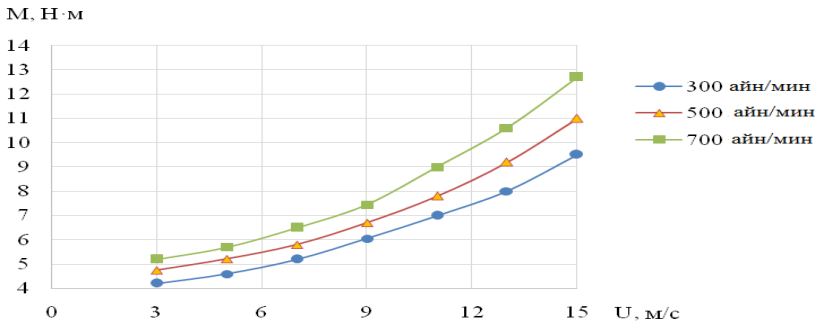
Сурет 2.36 – Әр түрлі көлбеу бұрыштары кезіндегі маңдайлық кедергі күші коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі

2.36-суретте көрсетілгендей, қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градус бұрышта орналасқанда, Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болған кезде 1,025 маңдайлық кедергі күші коэффициентінің оңтайлы мәндері алынады.

Әрі қарай екі және үш қалақшалары бар қозғалатын жел доңғалағына әсер ететін күш моментінің келе жатқан ағынның жылдамдығына тәуелділігінің графигі сандық түрде тұрғызылды (2.37, 2.38-суреттер).



Сурет 2.37 – Екі қалақшасы бар жылжымалы жел доңғалағына әсер ететін күш моментінің келе жатқан ағынның жылдамдығына тәуелділігінің графигі



Сурет 2.38 – Үш қалақшасы бар жылжымалы жел доңғалағына әсер ететін күш моментінің келе жатқан ағынның жылдамдығына тәуелділігінің графигі

2.37-графиктен көрініп тұрғандай, күш моментінің мәні жел жылдамдығының жоғарылауымен сызықты түрде артады. Екі қалақты жел қондырғысының күш моментінің ең үлкен мәні жел жылдамдығы 15 м/с және қалақ жылдамдығы 700 айн/мин болғанда 8,6 Н·м.

2.38-суреттен қалақшаның айналу жылдамдығы 700 айн/мин болатын үш қалақшалы жел доңғалақ екі қалақшалы жел доңғалағына қарағанда 46% көп айналу моментін беретіні анықталды. Олардың арасындағы күш моментінің мәндерінің айырмашылығы шамамен 4 Н·м құрайды.

Желдің пайдалану коэффициентін цилиндрлердің айналу қуатын алып тастағанда, жел доңғалағының айналу қуатының жел доңғалағымен жабылған беткі аймаққа келетін жел ағынының қуатына қатынасы ретінде анықталады:

$$\xi = \frac{N_r - N_c}{N_{wf}}, \qquad (2.14)$$

мұндағы

$N_c = mM_c\omega_c$ – цилиндрлердің айналу қуаты,

m – цилиндрлер саны;

$M_ц$ – күш моменті, айналмалы цилиндрге әсер етеді;

ω_c – цилиндрдің бұрыштық айналу жылдамдығы.

$N_{Wf} = \frac{\rho u^3 S}{2}$ – жел ағынының қуаты,

ρ – келе жатқан ағындағы ауаның тығыздығы;

$S = \pi R^2$ – жел доңғалағымен қамтылатын аудан;

R- ротор радиус;

u – ауа ағыны жылдамдығы,

$N_r = M_r \omega_r$ немесе $N_r = M_r \frac{2\pi n_1}{60}$ – ротор айналуының қуаты,

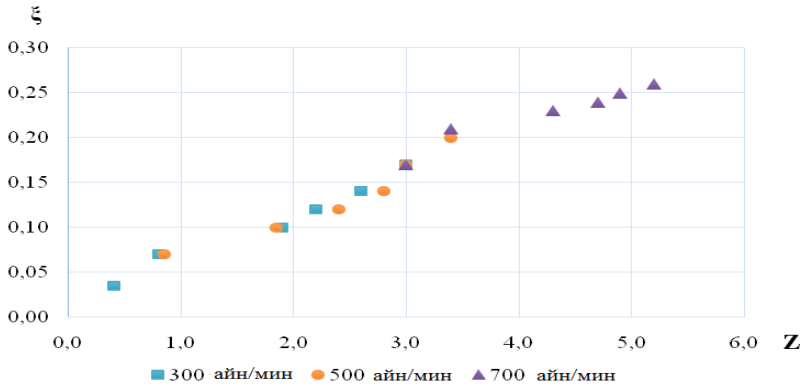
M_r – күш моменті, қозғалмалы роторға әрекет етеді;

n – цилиндрдің айналым саны;

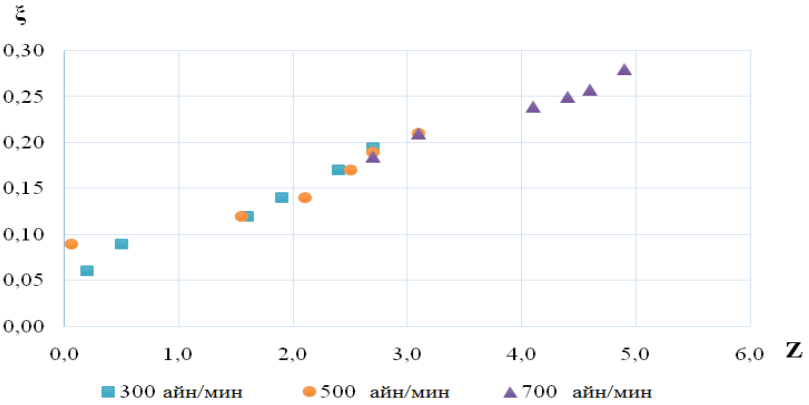
N – жел доңғалағының айналу жиілігі;

ω_r – ротордың еркін айналу бұрыштық жылдамдығы.

Төменде 2.39 және 2.40-суреттерде жел энергиясын пайдалану коэффициентінің (ЖЭПК) тез жүрістіліген тәуелділік нәтижелері көрсетілген.



Сурет.2.39 – Екі қалақшалы ЖЭҚ жел энергиясын пайдалану коэффициентінің тез жүрістіліге тәуелділігі



Сурет 2.40 – Үш қалақшалы ЖЭҚ жел энергиясын пайдалану коэффициентінің тез жүрістіліге тәуелділігі

2.39-суреттен көрініп тұрғандай, жел энергетикалық қондырғысының жел энергиясын пайдалану коэффициентін тезжүрістіліктін функциясы ретінде көрсетуге болады: $\xi = 0{,}0713 \cdot Z^{0{,}713}$.

Жел энергетикалық қондырғысының жел энергиясын пайдалану коэффициентін тезжүрістіліктін функциясы ретінде көрсетуге болады: $\xi = 0{,}1147Z^{0{,}409}$ (2.40-сурет).

ЖЭҚ энергия тиімділігі көрсеткіштеріне қалақшалардың саны әсер ететіні анықталды. 2.39 және 2.40-графиктерден көрініп тұрғандай, үш қалақшалы ЖЭҚ жел энергиясын пайдалану коэффициенті екі қалақшалы ЖЭҚ қарағанда шамамен 7-8% артық. Үш қалақшалы ЖЭҚ тез жүрістілігі екі қалақшалы ЖЭҚ қарағанда 6-7% төмен. Тез жүрістіліктің әрбір мәні жел энергиясын пайдалану коэффициентінің белгілі бір мәніне сәйкес келетіні анықталды.

2.7 Бөлім бойынша қорытынды:

- Көлденең айналу осі бар жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының математикалық моделі жасалды.
- Қалақшаның геометриялық пішінінің оңтайлы нұсқасы таңдалды.
- ЖЭҚ үшін қозғалмайтын қалақшаның әртүрлі көлбеу бұрышына орналасуы кезіндегі ауа ағынының жылдамдығына маңдайлық кедергі күші мен тарту күшінің тәуелділігі алынды.
- Қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градус бұрышта орналасқанда, Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болған кезде 1,025 маңдайлық кедергі күші коэффициентінің оңтайлы мәндері алынатыны анықталды.

3 ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛЫ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ТӘЖІРИБЕЛІК СТЕНДІ ЖӘНЕ ӨЛШЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

3.1. Әрекет етуші күштерді өлшеу әдістемесі

Бұл бөлімде ауа ағынымен денелердің айналу заңдылықтарын зерттеу әдістемесі қарастырылған, аэродинамикалық стенд сипатталған және ауа ағынының әртүрлі жылдамдықтары мен бағыттарында айналмалы цилиндрдің айналуындағы аэродинамиканы зерттеу бойынша эксперименттік зерттеулер жүргізу тәртібі берілген.

Қазіргі уақытта аэродинамикалық эксперимент үлкен жетістіктерге жетті. Оны жүзеге асыру үшін қолданылатын әдістер өте алуан түрлі [76].

Негізгі міндет, ең алдымен, айналу құбылыстарының қайтымдылық принципін атап өткен жөн. Бұл қағида ағын мен дененің күштік өзара әрекеттесуі дененің тыныштықтағы ортада қозғалуына немесе қоршаған ортаның денеге қарама-қарсы жылдамдықпен айналуына қарамастан бірдей болады. Дене қозғалысының жылдамдығы мен қозғалыстың өзгеруі жағдайында қозғалмайтын ағынның жылдамдығы бір-біріне тең болуы маңызды. Барлық заманауи аэродинамика үшін қайтымдылық принципі үлкен маңызға ие, ол қозғалатын газ ағынында ұшақтардың және олардың бөліктерінің қозғалмайтын модельдерімен тәжірибе жасауға мүмкіндік береді. Негізгі шарт-модель мен табиғаттың динамикалық ұқсастығын сақтау [77].

Зерттеу әдістерін екі топқа бөлуге болады:

1) онда қоршаған орта қозғалмайды, ал дене қозғалады;

2) онда дене қозғалмайды, ал орта қозғалады.

Бұл топтардың әрқайсысы дене мен ортаның салыстырмалы қозғалысын алудың бірқатар эксперименттік жолдарын қамтиды.

Бірінші топқа дене мен ортаның салыстырмалы қозғалысын алудың келесі жолдары кіреді:

- дененің түзу сызықты қозғалысы (дененің құлауы, ұшу сынақтары) ;
- дененің қисық сызықты қозғалысы;

Екінші топқа мыналар жатады:

- табиғи желді пайдалану;
- аэродинамикалық құбырлар.

Толығырақ қозғалыстың өзгеруіне негізделген аэродинамикалық зерттеу әдістерінің екінші тобына тоқталайық, яғни, зерттелетін дене қозғалыссыз және қоршаған орта қозғалады.

Диссертациялық жұмыста желдеткіштің көмегімен жасанды ауа ағыны жасалатын арналар болып табылатын аэродинамикалық құбырда жүргізілген эксперименттер қарастырылады.

Аэродинамикалық құбыр – эксперимент үшін ауа немесе газ ағынын жасайтын, денелердің айналуымен бірге жүретін құбылыстарды зерттейтін қондырғы. Аэродинамикалық құбырдағы тәжірибелер қозғалыстың қайтымдылық принципіне негізделген, оған сәйкес дененің ауаға (немесе сұйықтыққа) қатысты қозғалысын қозғалмайтын денеге түсетін ауа

қозғалысымен ауыстыруға болады. Тыныштықтағы ауадағы дене қозғалысын модельдеу үшін аэродинамикалық құбырда кез-келген нүктеде бірдей және параллель жылдамдықтарға (біркелкі жылдамдық өрісі), бірдей тығыздық пен температураға ие біркелкі ағын жасау керек. Әдетте аэродинамикалық құбырда жобаланған нысанның немесе оның бөліктерінің моделінің айналуын зерттейді және оған әсер ететін күштерді анықтайды [78].

Бұл ретте зертханалық жағдайларда модель үшін алынған нәтижелерді толық көлемді заттай объектіге ауыстыру мүмкіндігін қамтамасыз ететін шарттарды сақтау қажет. Осы шарттар орындалған кезде зерттелетін модель мен табиғи объект үшін аэродинамикалық коэффициенттер бір-біріне тең болады, бұл аэродинамикалық құбырдағы аэродинамикалық коэффициентті анықтауға және табиғатына әсер ететін күшті есептеуге мүмкіндік береді.

Аэродинамикалық құбырдың негізгі прототипін 1897 жылы ортадан тепкіш желдеткіштен шығатын ауа ағынын тәжірибе жасау үшін қолданған Циолковский К.Э. құрған. 1902 жылы Жуковский Н.Е. аэродинамикалық құбырды әзірледі және салды, онда осьтік желдеткіш 9 м/с дейінгі жылдамдықпен ауа ағынын жасады [79].

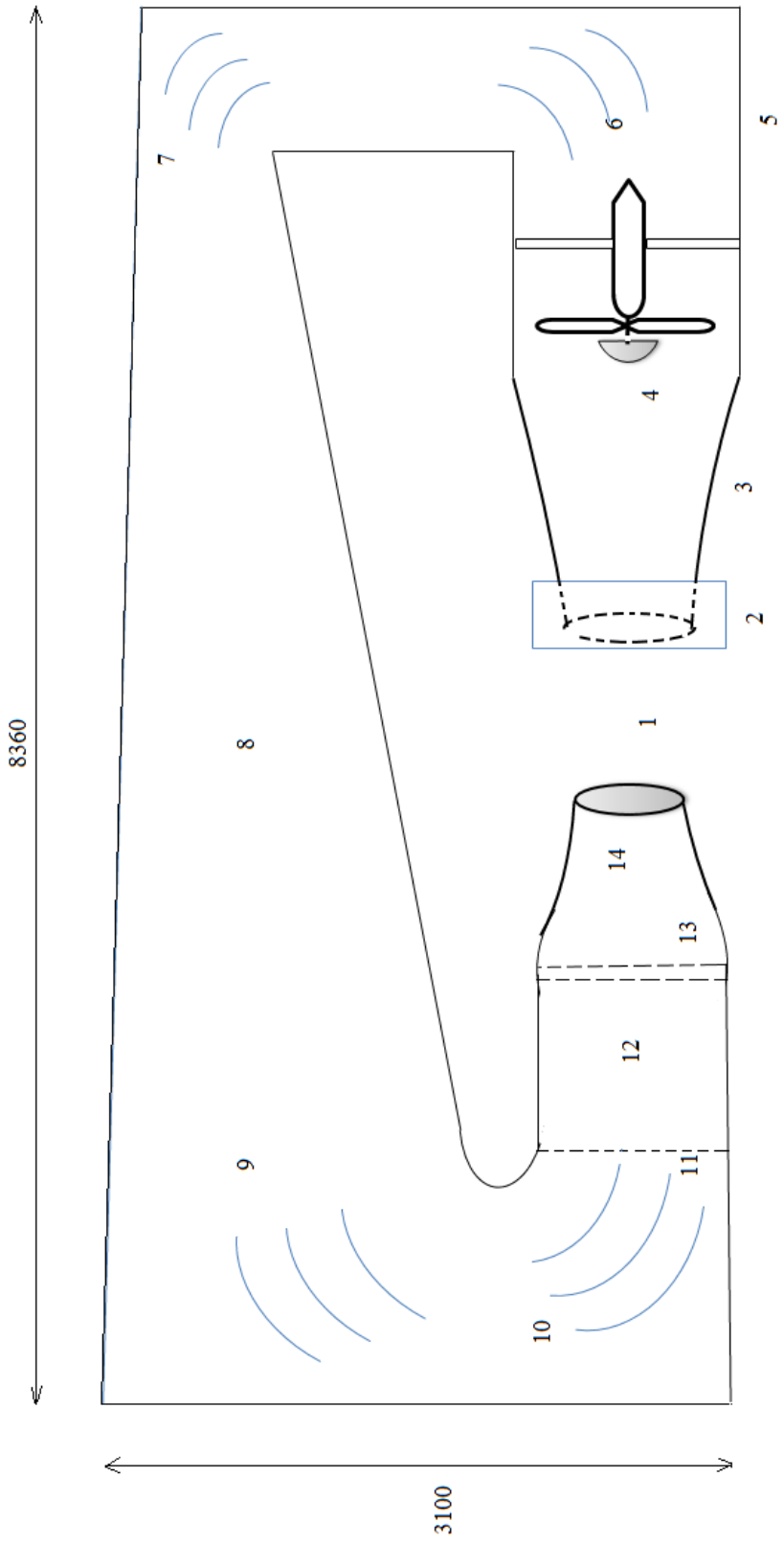
Алғашқы ашық сүлбелі аэродинамикалық құбырларды 1903 жылы Лондондағы Ұлттық физикалық зертханада Т.Стэнтон және 1906 жылы Мәскеуде Жуковский Н.Е., ал бірінші жабық аэродинамикалық құбырды 1907-1909 жылдары Геттингенде Прандтль Л. және 1910 жылы Стантон Т. жасаған [80]. Одан әрі аэродинамикалық құбырлардың дамуы негізінен олардың мөлшерін ұлғайту және аэродинамикалық құбырлардың негізгі сипаттамаларының бірі болып табылатын жұмыс бөлігінде (модель орналастырылған жерде) ағынның жылдамдығын арттыру жолымен жүрді.

Принципиалды сүлбе бойынша аэродинамикалық құбыр – бұл желдеткіштің көмегімен жасанды ауа ағынын жасайтын арналарды ұсынады. Бұл жұмыста жабық ауа ағыны бар аэродинамикалық құбыр қолданылды.

Т-1-М аэродинамикалық құбырға жұмыс бөлігі, диффузор, желдеткіш, өтпелі канал, айналмалы қалақшалар, туралау торлары, форкамера, коллектор (саптама) кіреді.

3.1-суретте Т-1-М аэродинамикалық құбырдың суреті көрсетілген, ал 3.2-суретте Т–1–М аэродинамикалық құбырдың принципиалды сүлбесі ұсынылған.

Сурет 3.1 – Т-1-М аэродинамикалық құбырдың суреті



1-жұмыс бөлігі, 2-сақина, 3-диффузор, 4-желдеткіш, 5-өтпелі арна, 6,7,9,10-айналмалы қалақшалар, 8-кері арна, 11-13-туралау торлары,
12-форкамера, 14-коллектор (саптама)

Сурет 3.2 – Т-1-М аэродинамикалық құбыр сүлбесі

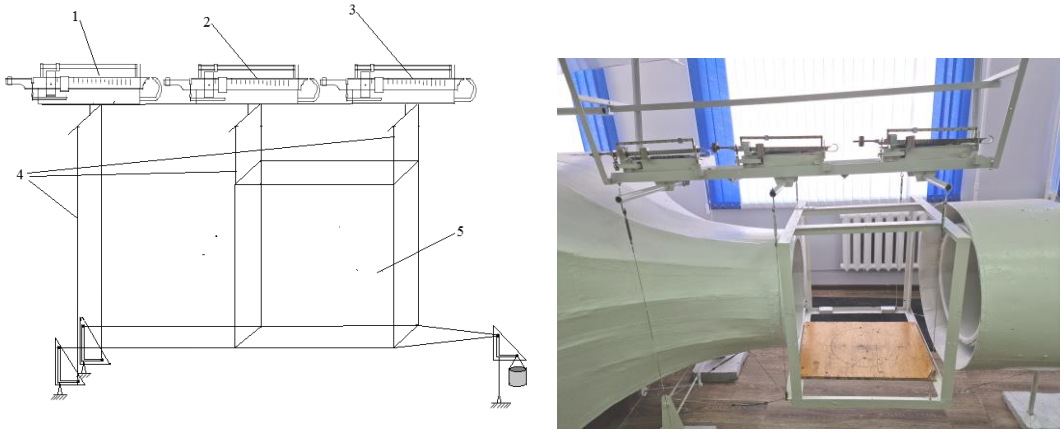
Т-1-М аэродинамикалық құбырдың негізгі бөлігі оның жұмыс бөлігі болып табылады. Құбырдың жұмыс бөлігі – зерттелетін дененің моделі аэродинамикалық таразыға бекітілген орын. Жұмыс бөлігінің ағынына ерекше талаптар қойылады. Ағын шекаралары модельдің айналуына әсер етпеуі үшін модельдің өлшемдері жұмыс бөлігінің сәйкес өлшемдерінен аз болуы керек.

Ең дәл және сенімді күштер мен моменттерді өлшеудің тікелей әдісі аэродинамикалық таразы арқылы өлшеу болып табылады [81].

Бұның бәрі ауа ағынының аэродинамикалық құбырда тұйық айналуын, құбырдың жұмыстық бөлігінде 5 ден 30 м/с – қа дейінгі жылдамдықтар диапазонында біртекті жылдамдықтар өрісін және қысымды алуды қамтамасыз етеді.

Аэродинамикалық құбырда цилиндр түріндегі көлденең айналатын осьтік денелер зерттелді. Зерттелетін денелер ағын бағытына перпендикуляр орналастырылды.

Үш компонентті аэродинамикалық таразылар. Аэродинамикалық таразы – аэродинамикалық құбырдағы модельге әсер ететін құрамдас аэродинамикалық күштер мен моменттерді өлшеуге арналған қондырғы немесе жүйе. Әрбір компонент жеке өлшеу арнасы – компонент арқылы қабылданады. Аэродинамикалық таразыларда бір-алты компонент болуы мүмкін. Әрекет принципі бойынша аэродинамикалық таразылар механикалық және электрлік (тензометриялық) болып бөлінеді [82]. Механикалық аэродинамикалық таразылар қатты жақтаудан (аэродинамикалық құбыр ағынының шекарасынан тыс орналасқан) және оны тепе-теңдік күйінде ұстайтын өзара байланысты рычаг жүйелерінен тұрады; рычаг механизмдерінің шығыс буындары өлшеу құралдарына қосылған. 3.3-суретте үш компонентті аэродинамикалық таразылардың сүлбесі көрсетілген.



а) ә)

а) Үш компонентті аэродинамикалық таразылардың сүлбесі мен ә) фото түсірілімі
1-маңдайлық кедергі күшін өлшейтін таразылар; 2 және 3 – көтеру күшін өлшейтін таразылар; 4-таразыны жұмыс бөлігімен байланыстыратын аспалар;
5 - зерттелетін макеттерді белгілеуге арналған жұмыс бөлігі

Сурет 3.3 – Аэродинамикалық таразы

Модель жақтауға тіректер немесе созылу белгілері арқылы орнатылады, сонымен қатар модельді орнату бұрыштарын қашықтан өзгерту механизмі бар [82, б.7].

Аэродинамикалық коэффициенттерді анықтау дәлдігі аспалар құрылымына байланысты. Таразыларда жүргізілетін өлшеулердің үлкен дәлдігі үшін тірек құрылғылардың конструкциясы екі шартқа сай болуы тиіс: 1) оларға әсер ететін аэродинамикалық күштер (бірінші кезекте маңдайлық кедергі күші) сыналатын модельге әсер ететін күштермен салыстырғанда аз болуы тиіс; 2) олар модельдің айналуын кіріс ағынымен аз бұрмалауы тиіс.

Үш компонентті аэродинамикалық таразылар әртүрлі ағын жылдамдықтарындағы көтеру күші мен маңдайлық кедергі күшін өлшейді. Осы аэродинамикалық таразыларды қосу тәсілі қосалқы жүктер арқылы тартылатын жіп аспасының (жіптердің, сымдардың) көмегімен жүзеге асырылады. Цилиндрдің алдыңғы маңдайлы жағына қарай ауа ағыны өтіп, күш түсіреді. Бұл күш таразыда көрінеді.

UNI - T UT362-USB интерфейсі және UNI-T компаниясының өндірісін өлшеу деректерін тіркеу функциясы бар термоанемометр (3.4-сурет)., UT362 дизайн ерекшеліктері мен жоғары техникалық сипаттамалары жоғары сенімділікті, сондай-ақ жылдамдықты, ауа ағынының температурасын және көлемдік ағынды өлшеу дәлдігін қамтамасыз етеді [83]. Бұл термоанемометрдің айрықша ерекшелігі - үлкен жұмыс дөңгелегі, төмен сырғуға төзімділік аялдамаларының арқасында әлсіз ауа ағындарының жылдамдығын сенімді түрде өлшеуге мүмкіндік береді, тіркеу аралығын орнату мүмкіндігі бар өлшеу деректерін Тіркеуші функциясы, сондай-ақ өлшеу нәтижелерінің деректерін кейіннен талдау және есеп беру үшін компьютерге беруге арналған USB интерфейсі.

Сурет 3.4 – Ағын жылдамдығын өлшеуге арналған
UNI-T UT362- термоанемометр

АТ-8 сандық тахометр (байланыссыз) айналу жылдамдығын өлшеуге және айналым санын анықтауға арналған (3.5-сурет). Фототахометрде орталық өңдеу блогы, фотоэлектрлік қабылдағыш және лазер қолданылады [84]. Өлшеу үшін оптикалық байланыссыз тахометрлер шағылысу әдісін қолданады: аспап шығаратын сәуле мезгіл сайын пленкадан шағылысады (бақылау объектісінің жылжымалы бөлігіне бекітілген) және сенсорға түседі, оның көмегімен айналу

жиілігіне сәйкес келетін уақыт бірлігінде «жарқылдар» саны есептеледі. Контактісіз тахометрлер кез-келген циклдік операциялардың жылдамдығын өлшеуге мүмкіндік береді.

Сурет 3.5 – Айналу жылдамдығын өлшеуге арналған
АТ-8 сандық фототахометр

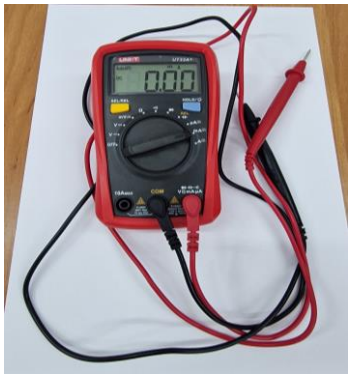
Динамометр (грек тілінен аударғанда динамис – «күш» және метрео – «өлшеймін») – күшті өлшеуге арналған құрал болып табылады. Динамометрдің негізгі бөлігі серпімді деформацияның әрекет ету аралығында созылатын серіппе болып табылады. Серіппеге шкала бойымен жылжитын кәрсеткіш бекітіледі (3.6-сурет).

Тігінен орналасқан серіппеге әр түрлі күш түсіре отырып, оның әр жолы қаншалықты созылғанын шкаланың көмегімен анықтауға болады. Ол үшін алдымен серіппе шкаласы градуирленеді. Градуирлеу дегеніміз – құралды нақты бөліктері бар шкаламен жабдықтау. Алдымен серіппе созылмаған кездегі көрсеткіштің орны белгіленеді. Осыдан кейін оған 1Н күш түсіріледі.

Түсірілген күш әрекетінен серіппе, мысалы, 1 см-ге созылған болсын. Гук заңына сәйкес серіппенің созылуы түсірілген күшке пропорционал екенін білеміз. Онда 2 см серіппе созылуына 2 Н күш, 3 см серіппе созылуына 3 Н күш сәйкес келеді. Осылайша градуирленген серіппе - динамометр көмегімен әр түрлі күштерді өлшеуге болады [85].

Сурет 3.6 – Тарту күшін өлшеуге арналған динамометр

Мультиметр – бұл әртүрлі электр шамаларын өлшеуге мүмкіндік беретін құрылғы [86]. Оның көмегімен кернеуді, өткізгіштің кедергісін өлшеуге, токты өлшеуге, сондай-ақ бірқатар басқа манипуляцияларды орындауға болады, олардың көлемі құрылғының функционалдығына байланысты (3.7-сурет).



Сурет 3.7 – Мультиметр

Айнымалы кернеуді өлшеу кезінде диапазон автоматты түрде таңдалады. Барлық өлшеу диапазондарындағы мультиметрдің кіріс кедергісі 10МОм құрайды. Жоғары импеданс тізбектерінде мұндай кіріс кедергісі қосымша өлшеу қателігін тудыруы мүмкін. Егер өлшенетін тізбектің кедергісі 10 КОм-дан аспаса, онда енгізілген қате шамалы (0,1% немесе одан аз).

Егер өлшенетін шама алдын-ала белгісіз болса, айналмалы қосқышты максималды шегіне қойып (10А) және өлшеудің қанағаттанарлық нәтижелері алынғанша өлшеу шегін біртіндеп азайту керек.

Сынақ зондтары қосымша 0,1 ~ 0,3 Ом кедергі бере алады. Шағын кедергілерді өлшеу кезінде дәл көрсеткіштерді алу үшін өлшеу алдында зондтарды қысқа тұйықтап, алынған мәні жазылады (оны Х деп атайық). (Х) бұл сынақ зондтарынан қосымша кедергі. Алынған мән қателікті өтеу үшін көрсеткіштерден алынады. Жоғары кедергілер үшін (1 МОм-дан жоғары) өлшеу тұрақты нәтижеге жету үшін бірнеше секунд кетуі мүмкін.

3.2 Құрамалы қалақшаның тәжірибелік үлгісі мен аэродинамикалық сипаттамасын талдау

Бұл жұмыста көлденең осьті айналмалы цилиндрлі құрамалы жел қондырғысының айнымалы ағындағы қозғалысының аэродинамикалық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу үшін тәжірибелік үлгісі әзірленді.

Зерттеу жұмысы физика-техникалық факультетіндегі «Баламалы энергетика» ғылыми-зерттеу орталығындағы «Аэродинамикалық өлшеулер» зертханасында айналмалы цилиндрлі құрамалы жел қондырғысының моделі жасалды, кейіннен ол көлденең ауа ағынында әр түрлі жел жылдамдықтарында зерттелді.

Цилиндрдің айналу жиілігі ауа ағынының (желдің) жылдамдығына байланысты, желдің жылдамдығына қатысты айналу жиілігі жоғарылаған

жағдайда, маңдайлық кедергіні арттыратын, құйын пайда болады, осы мәселені жою үшін құрылымға қозғалмайтын қалақша қосылды.

Қозғалмайтын қалақша цилиндрдің біркелкі ауа ағыны үшін қызмет етеді.

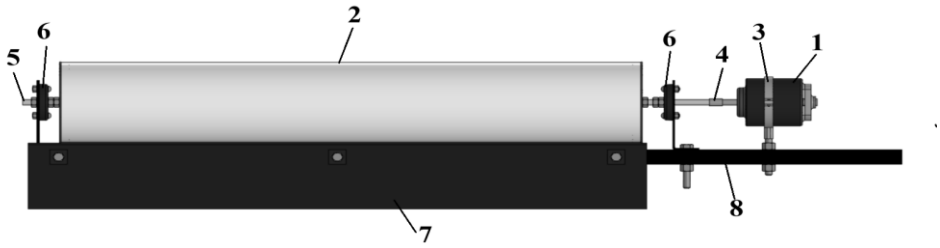
Бұл құрылғының айналмалы цилиндрлермен және қозғалмайтын қалақшамен жұмыс істеуі – цилиндр өз осінің айналасында айналатын, ал қалақша қозғалыссыз үдерісте болады.

Қозғалмайтын қалақшаның міндеті – желдің жылдамдығына қатысты айналу жиілігінің жоғарылауына байланысты пайда болатын құйындарды жою.

Бұл құрылымда алынған эксперименттік мәліметтер негізінде қозғалмайтын қалақшаның ауытқу бұрышы анықталды. Есептеулерге сүйене отырып, бұл ауытқу жел доңғалағының оңтайлы айналу жиілігі үшін тұрақты болып қалады.

Бұл әзірленген жұмыстың принципі қалақшалардағы қысым айырмашылығына байланысты көтеру күшін құруға негізделген. Айналмалы цилиндрдің көлденең айналуымен қалақшаның бір жағында қысымның төмендеуі және қарама-қарсы жағында қысымның жоғарылауы пайда болады, нәтижесінде көтеру күші пайда болуына әкеледі.

Жасалған жел қондырғысының құрылымының жеңілдігі аэродинамикалық кедергілердің минималды болуын қамтамасыз етеді, сонымен қатар желді пайдалану коэффициентінің өсуіне әкеледі (3.8-сурет). Жел қондырғысы 3-5 м/с желдің жылдамдығы болғанда жұмыс істей бастайды және желдің жылдамдығы 8-12 м/с болғанда тиімді жұмыс істейді.



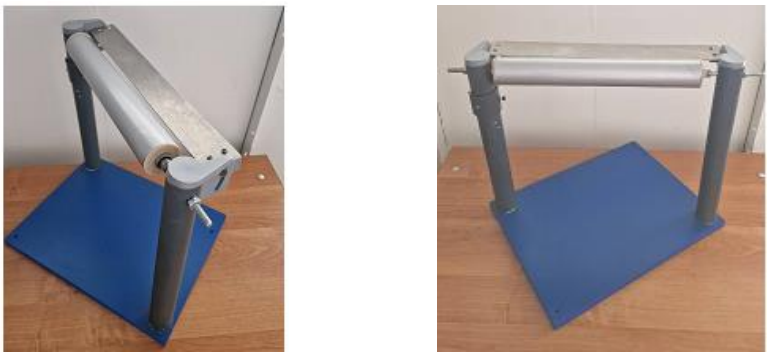
1-электр қозғалтқышы; 2-цилиндр; 3-электр қозғалтқышының бекітпесі; 4-муфта; 5-цилиндр мен қозғалтқыш арасындағы байланыс; 6-мойынтіректер; 7-қозғалмайтын қалақша; 8-қалақша негізі.

Сурет 3.8 – Қалақша құрылымы

Бұл құрылғының жұмыс істеу үдерісін келесідей түсіндіруге болады:

Электр қозғалтқышына кернеу берілген кезде (1) айналу муфта (4) арқылы айналу осіне (5) және мойынтіректерге (6) бекітілген цилиндрге (2) беріледі. Негізге (8) мойынтіректер (6), қозғалмайтын қалақша (7) және электр қозғалтқышының бекітпесі (3) бекітілген.

3.9-суретте зертханалық үлгіде қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндрлі макеті көрсетілген.



3.9-сурет. Қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндрлі макет

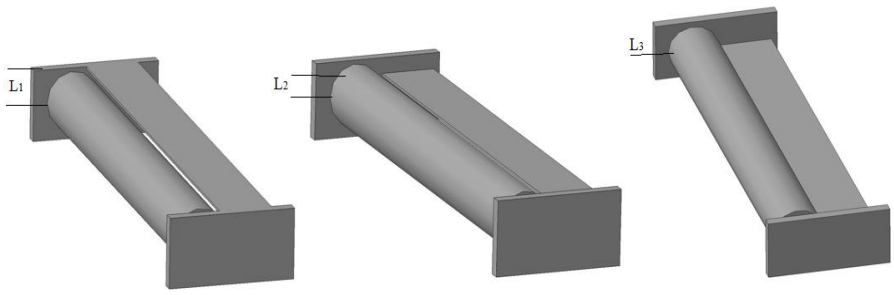
Қозғалмайтын қалақшаның ұзындығы – 0,4 м болса, ені – 0,05 м. Айналмалы цилиндрдің ұзындығы – 0,36 м-ге тең, цлиндрдің диаметрі – 0,05 м.

Зерттелетін үлгі аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігінде орналасып, көмекші элементтердің кедергілерін азайту үшін жіңішке металдық кергішпен аэродинамикалық таразыға бекітіледі. Маңдайлық кедергі күші мен көтеру күші жоғарғы дәлдік дәрежесімен үш компоненттік аэродинамикалық таразының көмегімен өлшенді.

Сынақтар тегіс бетті айналмалы цилиндрлі көлденең осьті құрамалы жел қондырғысымен жүргізілді. Ауа ағынының жылдамдығы 2,5-тен 15 м/с-қа дейін өзгерді, жел дөңгелегінің жалпы диаметрі D=50 мм, цилиндрлердің диаметрі d=50 мм, цилиндрлердің ұзындығы 360 мм, бекітілген қалашаның ұзындығы 400 мм.

Зерттеу жұмысының әдістерін қолдана отырып, жел энергетикалық қондырғысының қалақшасының геометриялық пішінін оңтайлы таңдауы және аэродинамикалық сипаттамаларына әсері зерттелді. Ағынның жылдамдығы 2,5-15 м/с аралығында өзгерді.

3.10-суретте бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осінің ара қашықтығына қатысты орналасу сүлбесі көрсетілген.

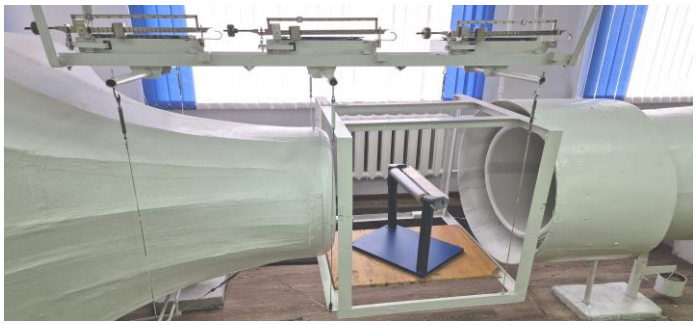


а) ә) б)

а) цилиндрдің айналу осінен L_1=25 мм жоғары; ә) цилиндрдің айналу осінен L_2=12,5 мм жоғары; б) цилиндрдің айналу осінің деңгейінде L_3

Сурет 3.10 – Бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты орналасу сүлбесі

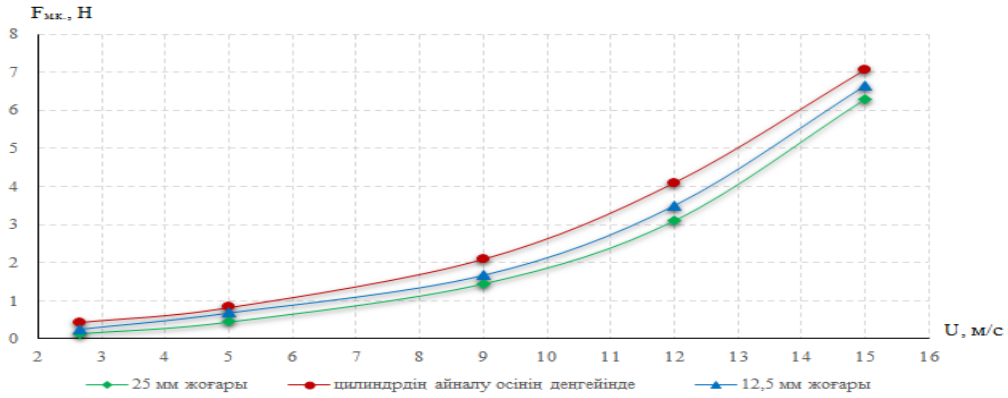
3.11-суретте диаметрі 50 мм болатын бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі бағытта орналасқан аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігіндегі эксперименттік қондырғының орналасу бейнесі көрсетілген.



Сурет 3.11 – Аэродинамикалық құбырдың жұмыс бөлігіндегі эксперименттік қондырғының орналасу бейнесі

Осы макеттің аэродинамикалық сипаттамалары ретінде ағын жылдамдықтары 2,5-2,6 м/с-тан 15 м/с-қа дейін болғанда айналмалы цилиндрлі құрамалы жел қондырғысының көтеру күші мен маңдайлық кедергі күші анықталды.

3.12-суретте бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі арақашықтықта орналасқан айналмалы цилиндрлі жүйесінің маңдайлық кедергі күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі келтірілген.

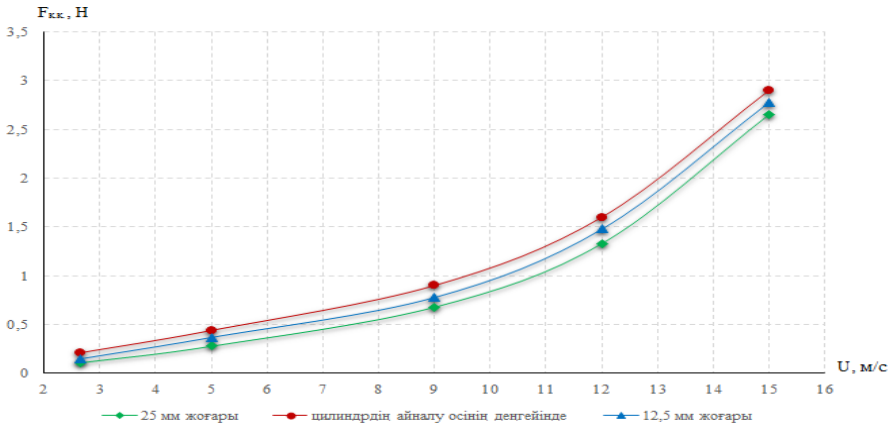


Сурет 3.12 – Маңдайлық кедергі күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі

3.12-суреттен бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі арақашықтықта орналасқанда ауа ағын жылдамдығы артқан сайын маңдайлық кедергі күші де артуын көреміз. Цилиндрдің айналу осіне қатысты орналасқан қалақшаның ауа ағын жылдамдығы артқанда маңдайлық кедергі күшінің яғни екі айналу осіне қатысты орналасқан қалақшаға қарағанда едәуір өсуін көреміз. Маңдайлық кедергі күшінің артқан себебі белгілі бір жылдамдықпен қозғалып бара жатқан ағын өз жолында ұшыраған дене бетіне арындық күшпен әсер етеді. Бұл күштің шамасы ағын жылдамдығына тура пропорционал болып ол жылдамдықпен бірге өседі. Ал маңдайлық кедергі күші

сол арындық күшке кері бағытталған. Ағын жылдамдығы артқанда арындық күштің әсерінен зерттеліп жатқан жел қондырғысының маңдайлық кедергі күші де арта түседі. Сондықтан маңдайлық кедергі күші ауа ағынының жылдамдығы артқанда өседі. Цилиндрдің маңдайлық кедергі күшіне айналу саны да әсер етеді. Бұл әсерді тәуелділікте келтірілген үш қисықтың бір-біріне қатысты орналасуынан көруге болады [87-90].

3.13-суретте бекітілген қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі арақашықтықта орналасқан айналмалы цилиндрлі жүйесінің көтеру күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген.

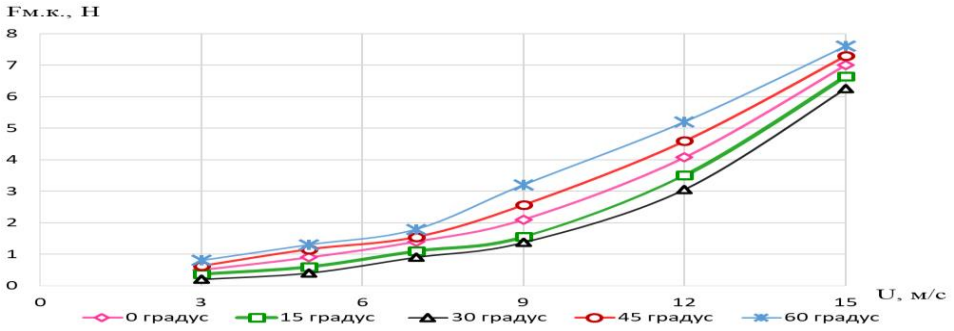


Сурет 3.13 – Көтеру күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі

3.13-суреттен ағын жылдамдығы 2,5 м/с-тан 15 м/с-қа дейін артқан сайын көтеру күші 0,11-0,21 Н-нан 2,65-2,9 Н-ға дейін өсуін көреміз. Тәуелділіктен байқағандай цилиндрдің айналу осіне қатысты орналасқан қалақшаның ауа ағын жылдамдығы артқанда көтеру күші екі айналу осіне қатысты орналасқан қалақшадан қарағанда 0,21 Н-нан 2,9 Н-ға дейін өскенін көреміз Себебі ауа ағын жылдамдығы жоғарлағанда айналмалы цилиндрдің артқы бөлігіне әсер ететін ағынның арынды қысымы артады [91-93]. Тәуелділіктен көріп тұрғанымыздай көтеру күшінің максималды жылдамдығы 15 м/с болған кезде үш сызықтында 2,9 Н, 2,78 Н, 2,65 Н жетті, әрі қарай көтеру күші тұрақтанады, яғни артуы байқалмайды.

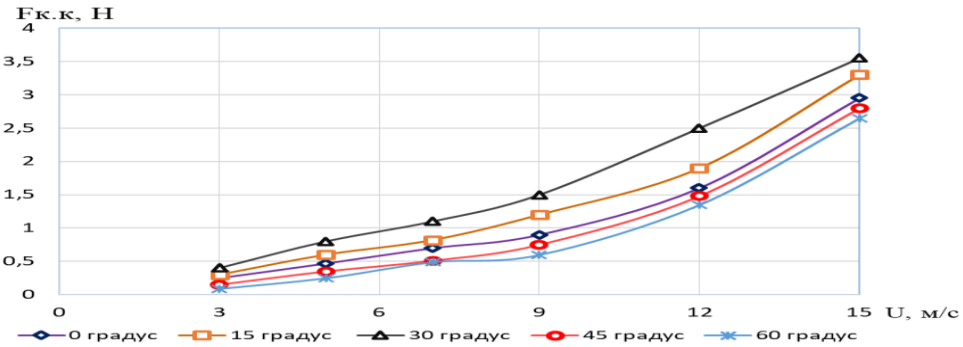
3.14-тәуелділікте айналмалы цилиндрдің қозғалмайтын қалақшасы ауа ағынына 30^0 бұрышта орналасқан кезде маңдайлық кедергісі төмен болады, ағынның көлбеу бұрыш $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ дейін көтергенде маңдайлық кедергі күші ең төменгі мәніне жетеді – 6,25 Н, 6,65 Н және 7 Н, сондықтан көлбеу бұрышы $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ аралығында айналмалы цилиндр түріндегі құрамалы жел энергетикалық қондырғының элементі тиімді жұмыс істейді.

Ал қозғалмайтын қалақшаның цилиндрге қатысты орналасу бұрышы $45^0 \leq \alpha \leq 60^0$ кезінде Fм.к.=7,3 Н және 7,6 Н тең, бұл жағдайда жел энергетикалық қондырғының күш элементі қалыпсыз жұмыс істейді, жұмыстың техникалық минималды әсері қамтамасыз етіледі, яғни жұмыс тиімділігі күрт төмендейді.



Сурет 3.14 – Маңдайлық кедергі күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі

3.15 – суретте көтеру күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген.



Сурет 3.15 – Көтеру күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі

3.15-суретте ауа ағынының жылдамдығы U= 15 м/с айналмалы цилиндрдің қозғалмайтын қалақшасы 30^0 бұрышта болған кезде ауа ағынының бағыты көтеру күшін максималды мәнге 3,55 Н жеткізеді, цилиндрдің қозғалмайтын қалақшасының ағынның көлбеу бұрыш $45^0 \le \alpha \le 60^0$ өзгергенде, көтеру күші минималды мәнге дейін төмендейді.

Инженерлік тәжірибеде аэродинамикалық коэффициенттерді есептеу үшін келесі формулалар қолданылады [94]:

$$C_y = \frac{\Delta F_y}{\rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot S} \qquad C_y = \frac{2F_y}{\rho u^2 \cdot S}. \tag{3.1}$$

, немесе

$$C_x = \frac{\Delta F_x}{\rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot S}, \text{ немесе } C_x = \frac{2F_x}{\rho u^2 \cdot S}. \tag{3.2}$$

$$C_m = \frac{\Delta F_m}{\rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot S}, \text{ немесе } C_m = \frac{2F_m}{\rho u^2 \cdot S}. \tag{3.3}$$

мұндағы

ΔF_x – маңдайлық кедергі күші, [Н];

ΔF_y – көтеру күші, [Н];

ΔF_m – тарту күші, [Н];

ρ – ауаның тығыздығы, [кг/м^3];

u – ауа ағынының жылдамдығы, [м/с];

S – мидель қимасының ауданы, [м^2].

Әмбебап өлшемсіз тәуелділіктерді алу үшін эксперименттерде өлшемсіз жылдамдық ретінде *Re* - инерция күштерінің тұтқырлық күштеріне қатынасын сипаттайтын Рейнольдс саны қолданылады:

$$\mathrm{Re} = \frac{u \cdot d_ц}{\nu}, \qquad (3.3)$$

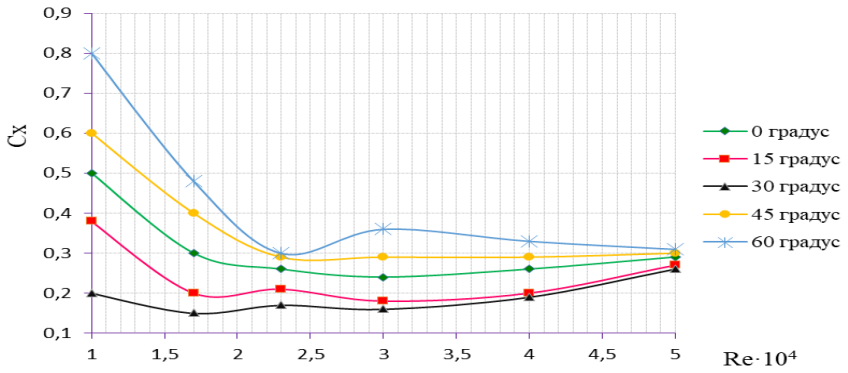
мұндағы

$d_ц$ – цилиндрдің диаметрі, [м];

ν – ауаның кинематикалық тұтқырлығы, [$м^2/с$].

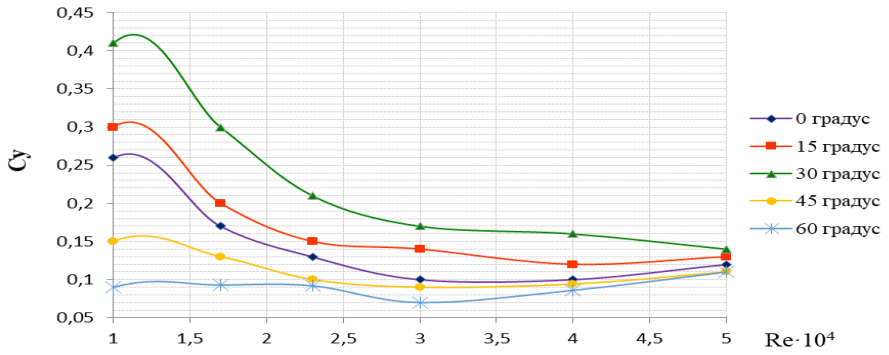
Эксперимент жағдайында ауаның тығыздығы мен тұтқырлығының мәндері сәйкесінше тең болады: $\rho = 1.21$ кг/м^3, $\nu = 1.49 \times 10^{-5}$ м^2/с.

Жоғарыда көрсетілген формулалар көмегімен аэродинамикалық коэффициенттер анықталды (3.16, 3.17-суреттер).



Сурет 3.16 – Әртүрлі көлбеу бұрыштың мәндері кезіндегі маңдайлық кедергі коэффициентінің Re санына тәуелділігі

3.16-суреттегі тәуелділікте маңдайлық кедергі коэффициенті жел жылдамдығының әртүрлі мәндері кезінде айналмалы цилиндрдің қозғалмайтын қалақшасы α = 0^0; 15^0; 30^0; 45^0; 60^0 көлбеу бұрыштарында орналасқан, ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен маңдайлық кедергі коэффициентінің төмендеп, қайта өсуі байқалады.



Сурет 3.17 – Әртүрлі көлбеу бұрыштың мәндері кезіндегі көтеру күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі

Жоғарыда келтірілген графиктен (3.17-сурет) жел жылдамдығының жоғарылауымен, айналмалы цилиндрдің қозғалмайтын қалақшасы $\alpha = 0^0$; 15^0; 30^0; 45^0; 60^0 көлбеу бұрыштарында өзгерген кезде, көтеру күші коэффициентінің өзгерісі байқалады. Көлбеу бұрыш 30^0 болғанда көтеру күші коэффициенті артады, көлденең осьтегі айналмалы цилиндр түріндегі құрамалы жел энергетикалық қондырғының элементі тиімді жұмыс істейді.

Айналмалы қозғалыстағы көлденең осьті айналмалы цилиндрлі құрамалы жел қондырғысының зерттеуге арналған теориялық материалдарға сүйене отырып жасалған тәжірибелік зерттеулерден келесі нәтижелер алынды:

- Қозғалмайтын қалақша диаметрі 50 мм-лі цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі арақашықтықта орналасқан әсері зерттеліп, аэродинамикалық сипаттамалардың тиімді мәндері және оңтайлы орналасу арақашықтығы анықталды.

Алынған нәтижелерді айналмалы цилиндрлі құрамалы көп қалақшалы жел қондырғысын құрастырып тәжірибе жасау үшін қолдануға болады. Тәжірибенің нәтижелері айналмалы цилиндрді орай аққанда пайда болатын Магнус эффектісі арқылы қозғалатын қосымша күшті қолдануға болатынын көрсетті. Бұл жел қондырғысы 3 м/с жел жылдамдығынан бастап энергия өндіре алады.

3.3 Екі-үш қалақшалы жел қондырғысының зертханалық модельдерін сипаттау және зерттеу нәтижесін талдау

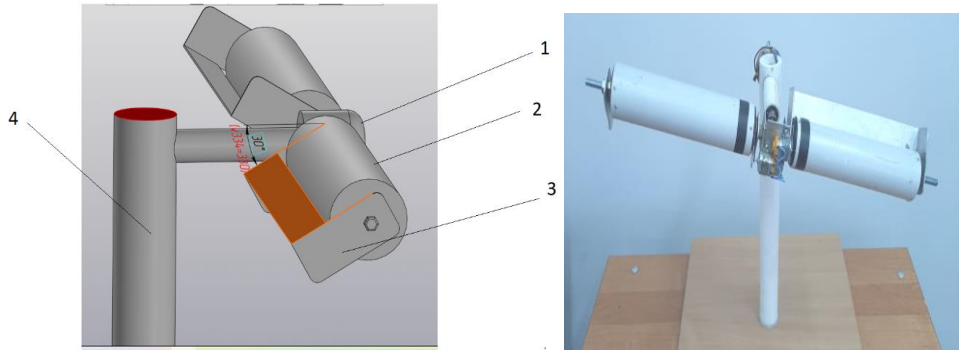
Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғының геометриялық өлшемдері (3.18-сурет): цилиндрдің ұзындығы – 0,23 м; цилиндр диаметрі – 0,05 м; қозғалмайтын қалақшаның ұзындығы – жел доңғалағының радиусы – 0,25 м.

Айналмалы цилиндрлерді қозғалмайтын қалақшалармен толықтыру қосымша көтеру күшін тудырады, бұл жел доңғалағының айналу жиілігінің жоғарылауына әкеледі.

Бұл процестің мәні мынада: айналмалы цилиндрге қосылған қозғалмайтын қалақша жел доңғалақ қалақшасының профилінің қисаюын

күшейтеді. Бұл жағдайда қисықтық қана емес, сонымен қатар қалақшаның тікелей ауданы да артады.

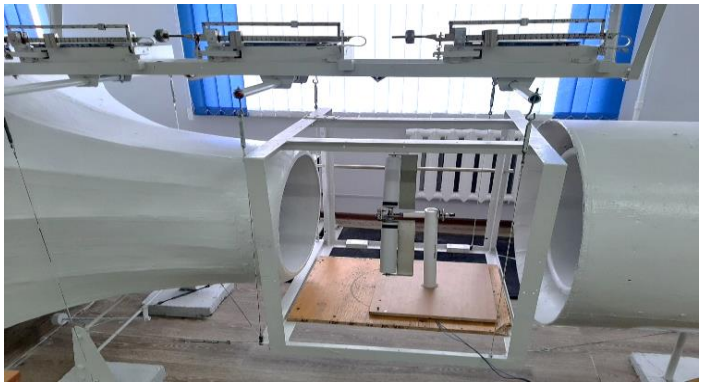
Осы көрсеткіштердің өзгеруіне байланысты орай ағу бейнесі толығымен өзгереді. Бұл факторлар көтеру коэффициентінің өсуін анықтайды.



1 – генератор, 2 – цилиндр, 3 – қозғалмайтын қалақша, 4 – діңгек

Сурет 3.18 – Қозғалмайтын қалақшалары мен айналмалы цилиндрлері бар жел қондырғысының принципиалды сүлбесі және фото суреті

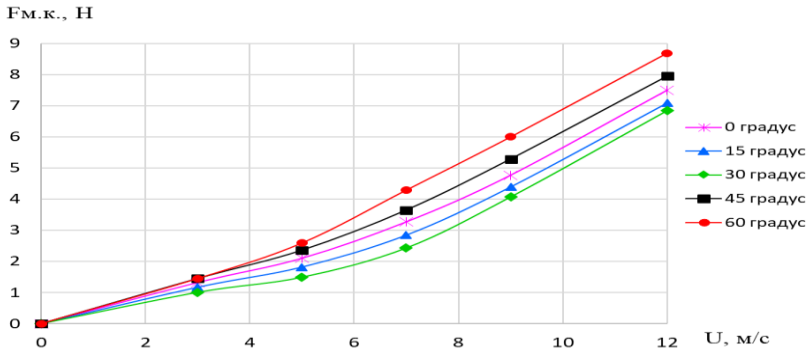
3.19-суретте диаметрі 0,05 м болатын қозғалмайтын қалақшасы мен айналмалы цилиндрлері бар екі қалақшалы макеттің эксперименттік үлгісі көрсетілген.



Сурет 3.19 – Екі қалақшалы макеттің эксперименттік үлгісі

Тәжірибелер тегіс цилиндрлік айналмалы көлденең осьтік құрамалы жел қондырғысымен жүргізілді. Ауа ағынының жылдамдығы 3-тен 12 м/с-қа дейін, жел доңғалағының жалпы диаметрі d=50 см, цилиндр диаметрі d=0,5 см, цилиндр ұзындығы 21 см, қозғалмайтын қалақшаның ұзындығы 23 см.

3.20-суретте қозғалмайтын қалақшаның цилиндрге қатысты орналасуының әртүрлі нұсқаларында ағынның жылдамдығынан маңдайлық кедергі күшін эксперименттік есептеу нәтижелері келтірілген.



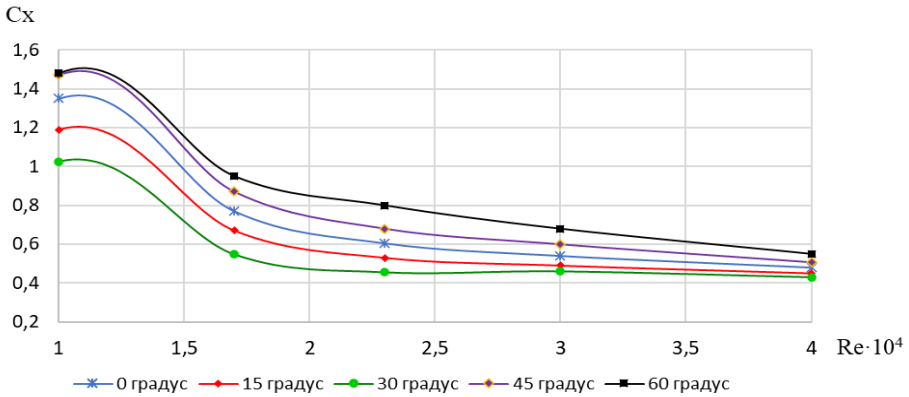
Сурет 3.20-сурет. Маңдайлық кедергі күшінің ағын жылдамдығына тәуелділігі

Алынған тәуелділіктен (3.20-сурет) маңдайлық кедергі күшінің ағын жылдамдығына пропорционалды тәуелділігі көрінеді. Қозғалмайтын қалақшаның әр түрлі α бұрыштарымен цилиндрге қатысты орналасу тәуелділігін салыстырып қарасақ, айналмалы цилиндрлер мен қозғалмайтын қалақшалары бар жел қондырғысының көтеру күшінің мәні қалғандарына қарағанда цилиндрге қатысты бұрышы α=30º кезінде төмен.

Бұл қозғалмайтын қалақшаның α=30º бұрышымен орналасуы кезінде профиль қисықтығын арттыру арқылы көтеру күші жоғарылайтындығына байланысты.

Осылайша, цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшалардың α=30º бұрышпен орналасқанда оңтайлы аэродинамикалық сипаттамаларға ие.

3.21-суретте қозғалмайтын қалақшаның цилиндрге қатысты әртүрлі орналасу нұсқаларында маңдайлық кедергі күші коэффициенттерінің Рейнольдс санына тәуелділігі көрсетілген.



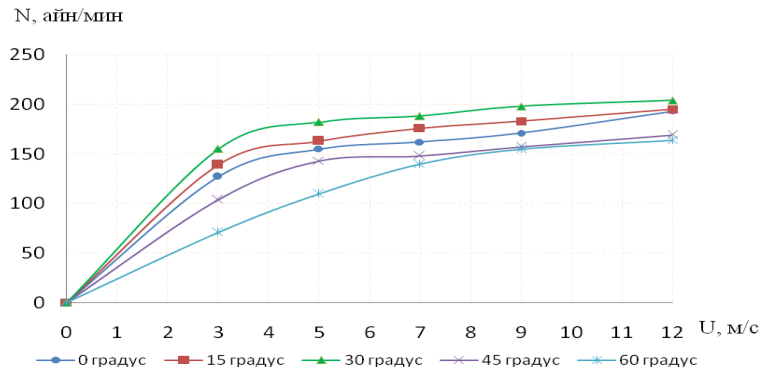
Сурет 3.21 – Маңдайлық кедергі күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі

3.21-суреттен көріп отырғанымыздай, қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 0º≤α≤30º градусқа орналастырылған кезде маңдайлық кедергі күші коэффициенттерінің оңтайлы мәндері алынады: Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болған

кезде 1,025 (α=30º). Қалған 45º≤α≤60º кезде құрамалы қалақша максималды маңдайлық кедергі күші мен минималды көтеру күшін береді.

Цилиндрлердің айналмалы қозғалыстары цилиндрлердің артында кері ағындардың жеткілікті көлемді құйынды аймағының пайда болуына әкеледі, олардың өлшемдері жүгірмелі ағынының жылдамдығына байланысты [95-98].

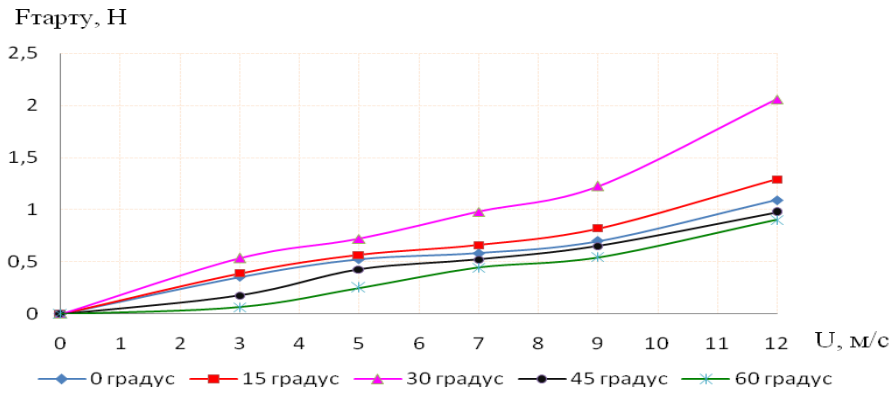
Желдің жылдамдығы артқан сайын біз көреміз жел қондырғысының айналу жиілігі де артады, оны төмендегі графиктен (3.22-сурет) көруге болады. Біз айналу жиілігін контактісіз тахометрмен анықтаймыз.



Сурет 3.22 – Макеттің айналу жиілігінің жел жылдамдығына тәуелділігі

3.22-суретте көрсетілгендей, ауа ағынының жылдамдығы 3 м/с -тан 12 м/с-қа артқан кезде жел энергетикалық қондырғының жел доңғалағының айналу жиілігінің жоғарылауы байқалады.

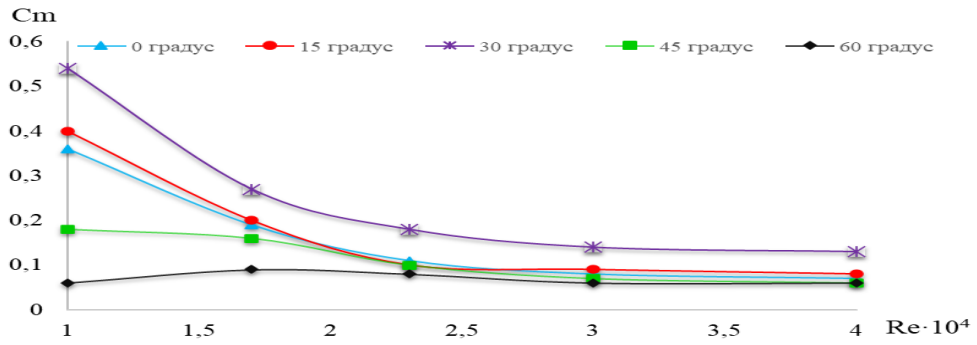
3.23-суретте тарту күшінің жел жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген.



Сурет 3.23 – Тарту күшінің жел жылдамдығына тәуелділігі

3.23-суретте ағынның жылдамдығы 3 м/с-тан 12 м/с-қа дейін ұлғайған сайын тарту күшінің жоғарылауын көреміз. Тәуелділіктен көрініп тұрғандай, ауа ағынының максималды жылдамдығы 12 м/с болғанда, тарту күшінің мәні 60 градуста 0,9 Н, 45 градуста 0,97 Н, 0 градуста 1,09 Н, 15 градуста 1,29 Н, 30 градуста 2,06 Н, содан кейін тарту күші тұрақтанады, яғни өсу байқалмайды.

Тарту күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі алынды (3.24-сурет).



Сурет 3.24 – Тарту күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі

3.24-суреттегі жағдайда қалақшалардың айналуының нашарлауы байқалатын бұл бұрыш 60 градус болып табылады, мұнда тарту күші азаяды, нәтижесінде тарту күші коэффициенті ең минималды мәнде болады. Әрі қарай, көлбеу бұрышы 15 және 30 градусқа өзгерген кезде, тарту күшінің біртіндеп өсуі байқалады, яғни тарту күші коэффициенті мәндерінің жоғарылауын көрсетеді. Бұл қалақшалардың айналуы үшін оң нәтиже береді.

Қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышын өзгерту профиль қисықтығын тудырады. Осылайша, тарту күшін тиімді түрде арттыруға болады.

Цилиндрдің маңдай алды бөлігінде шекаралық қабаттың бөліну нүктесіне дейін әр түрлі ұзартулар мен қозғалмайтын қалақшаның көлбеуі үшін тәжірибелік мәліметтердің біртіндеп қабаттасуы байқалады.

Жел жылдамдығының жоғарылауымен көтеру күші де артады деп білетіндіктен, жел жылдамдығының жоғарылауымен және тарту күші артады деп қорытынды жасауға болады өйткені тарту күші цилиндр үстіндегі қысымның төмендеуінде көрінеді.

Цилиндрдің төменгі бөлігі жоғары қысымда, ал жоғарғы бөлігі төмен қысымда жұмыс істейді. Үстіңгі және астыңғы қысым айырмашылығы тарту күшін тудырады.

Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері негізінде келесі тұжырымдар жасауға болады:

- Жел энергетикалық қондырғысының тарту күшін арттыру мақсатында айналмалы цилиндр және қозғалмайтын қалақшалар түріндегі құрамалы қалақшалары бар жел энергетикалық қондырғысының макеті әзірленді және жасалды;

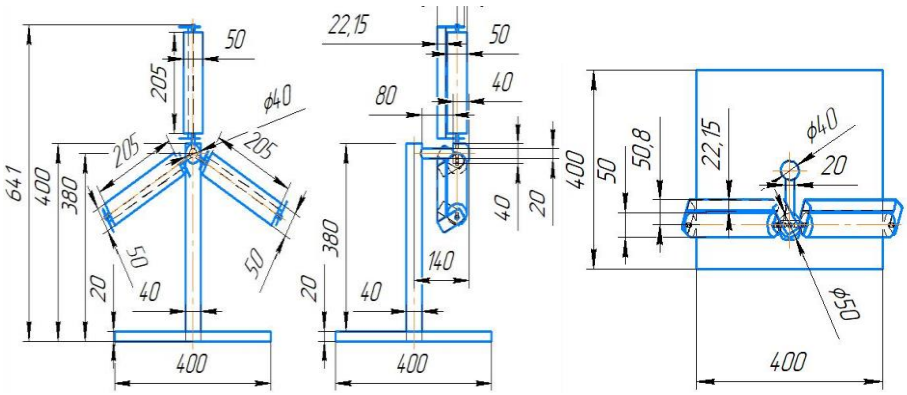
- цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның орналасуының әртүрлі бұрыштарында жел жылдамдығының өзгеруіне байланысты жел доңғалағының тарту күші мен айналу жиілігін зерттеу бойынша эксперименттер жүргізілді;

- қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышы 30 градус болғанда және желдің жылдамдығы 12 м/с болғанда жел дөңгелегінің айналу жиілігінің максималды мәні 205 айн/мин және тарту күші 2,06 Н болатындығы анықталды.

Жұмыстың практикалық қолданылуы мынада: қозғалмайтын қалақшаларды жел доңғалағымен толықтыру айналу кезінде жел энергиясын толық пайдалануды қамтамасыз етеді. Құрамалы қалақшалары бар ұсынылған

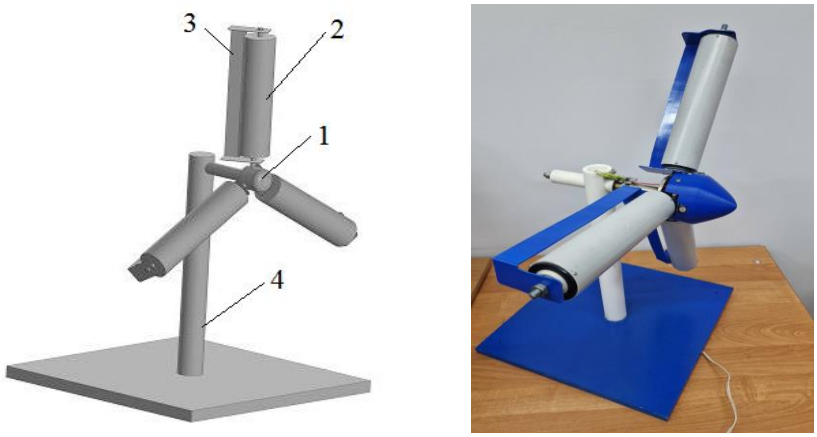
жел қондырғысы тиімді, себебі ол жел доңғалағының айналуын 3 м/с-тан бастайды, бұл жел қондырғысы өрістік жерлерде автономды балама электрмен жабдықтауға жарамды [99, 100].

Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғының геометриялық өлшемдері көрсетілген сызба нұсқасы ұсынылады (3.25-сурет).



Сурет 3.25 – Тәжірибелік үлгінің өлшемдері мен сызба нұсқасы

Эксперимент жасау мақсатында осы сызба нұсқа негізінде жел энергетикалық қондырғының тәжірибелік үлгісі жасалды (3.26-сурет).

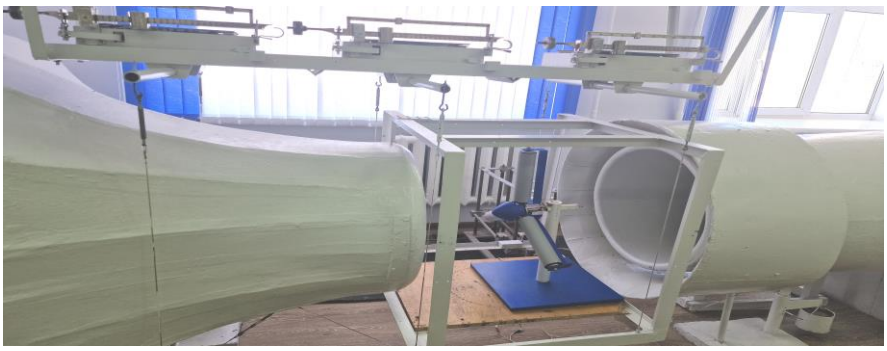


1 – генератор, 2 – цилиндр, 3 – қозғалмайтын қалақша, 4 – діңгек

Сурет 3.26 – Қозғалмайтын қалақшалары мен айналмалы цилиндрлері бар ЖЭҚ принципиалды сүлбесі және фото суреті

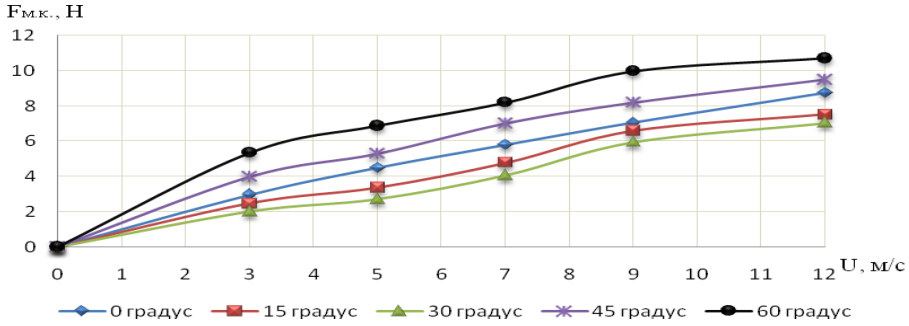
Тәжірибелер аэродинамикалық құбырда жүргізілді (3.27-сурет), бұл желдеткіштің көмегімен жасанды ауа ағыны пайда болатын арналар.

Аэродинамикалық құбыр – эксперимент үшін ауа немесе газ ағынын жасайтын, денелердің айналуымен бірге жүретін құбылыстарды зерттейтін қондырғы. Аэродинамикалық құбырдағы тәжірибелер қозғалыстың қайтымдылық принципіне негізделген, оған сәйкес дененің ауаға (немесе сұйықтыққа) қатысты қозғалысын қозғалмайтын денеге түсетін ауа қозғалысымен ауыстыруға болады [101, 102].



Сурет 3.27 – Үш қалақшалы макеттің эксперименттік үлгісі

Жел энергетикалық қондырғының маңдайлық кедергі күші ауа ағынның 3 м/с –тен 12 м/с-қа дейінгі жылдамдығы кезінде анықталды (3.28-сурет).



Сурет 3.28 – Маңдайлық кедергі күшінің ауа ағынының жылдамдығына тәуелділігі

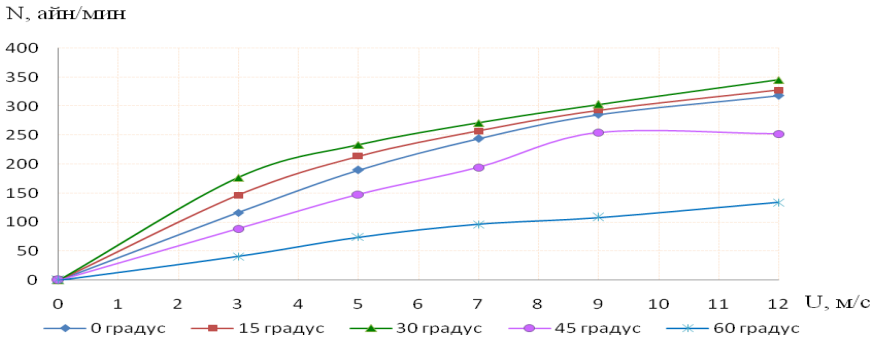
3.28-суретте қозғалмайтын қалақша цилиндрдің айналу осіне қатысты әртүрлі қашықтықта орналасқан кезде ауа ағынының жылдамдығы артқан сайын маңдайлық кедергі күші де арта түсетінін көруге болады.

Тәуелділікте ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен көтеру күші 7,04 Н-ден 10,7 Н-ге дейін өсетінін көрсетеді. 12 м/с максималды жылдамдықта маңдайлық кедергі күші 8,75 Н (α=0º, α - қозғалмайтын қалақшаның көлбеу бұрышы), 7,51 Н (α=15º), 7,04 Н (α=30º), 9,47 Н (α=45º), 10,7 Н (α=60º), тең болады, содан кейін маңдайлық кедергі күші тұрақтанады, яғни өсу байқалмайды.

Маңдайлық кедергі күшінің жоғарылауының себебі – белгілі бір жылдамдықпен қозғалатын ағын дененің бетіне арын күшімен әсер етеді, ол өз жолында әрекет етеді. Бұл күштің шамасы ағынның жылдамдығына тура пропорционал.

Маңдайлық кедергі күші осы арынды күшке кері бағытталған. Ағынның жылдамдығы артқан сайын, арын күшінің әсерінен зерттелетін жел қондырғысының маңдайлық кедергі күші де артады. Демек, маңдайлық кедергі күші ауа ағынының жылдамдығы артқан сайын артады. Цилиндрдің маңдайлық кедергі күшіне айналу саны да әсер етеді.

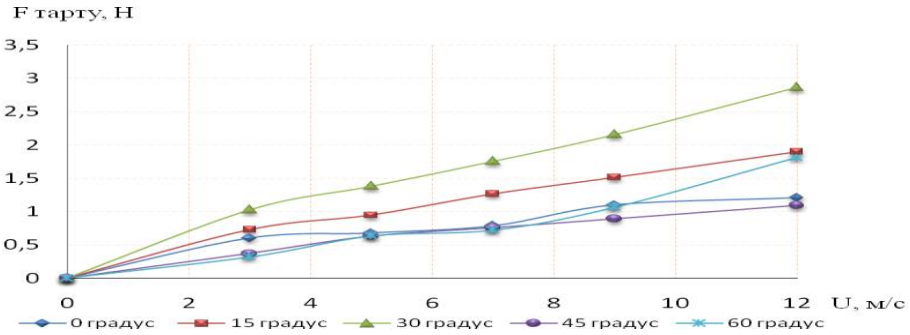
3.29-суретте макеттің айналу жиілігінің жел жылдамдығына тәуелділігі алынды.



Сурет 3.29 – Макеттің айналу жиілігінің жел жылдамдығына тәуелділігі

3.29-суреттегі үш қалақшалы жел қондырғысының айналу жилігі жел ағынының жылдамдығы жоғарылауымен артатынын көреміз. Бірақ, екі қалақшалы жел қондырғысының айналым санына қарағанда (3.21-сурет) төмен екені анықталды. Бұл қозғалыс кезінде қалақша санының көптігі ауа қабатын қиып өтуімен айналым санының азаюына әкелуімен түсіндіріледі [103].

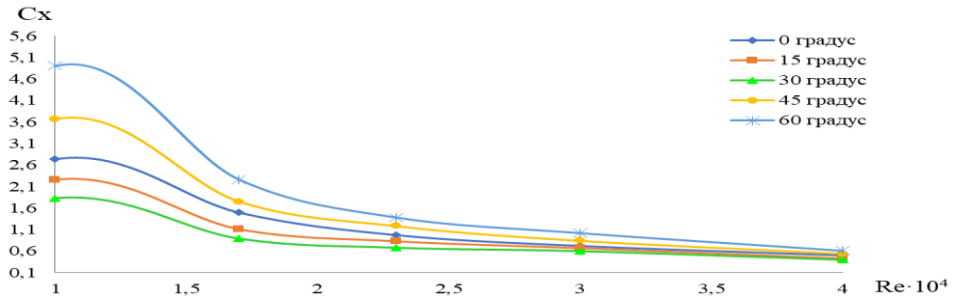
3.30-суретте тарту күшінің жел жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген.



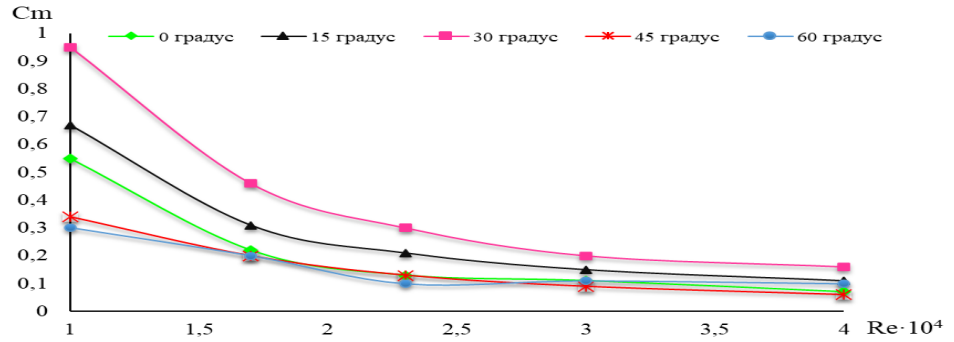
Сурет 3.30 – Тарту күшінің жел жылдамдығына тәуелділігі

3.30-суретте ауа ағыны жылдамдығы артқан сайын, үш қалақшалы жел қондырғысының тарту күші де өседі. Қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градус орналасқанда оңтайлы 2.9 Н мәнге ие болды. Үш қалақшалы жел қондырғысының тарту күші екі қалақшалыға қарағанда жоғары болатыны анықталды.

Аэродинамикалық коэффициенттердің анықталуы 3.31, 3.32-суреттерде көрсетілген. 3.31-суреттерінде көрсетілгендей, қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градусқа орналастырылған кезде Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болғанда маңдайлық кедергі күшінің коэффициенттерінің Cx мәндері алынды: 2,73 (α=0º), 2,26 (α=15º), 1,83 (α=30º), 3,67 (α=45º), 4,9 (α=60º). Көлбеу бұрыш α=30º кезде құрамалы қалақша минималды (оңтайлы) маңдайлық кедергі күшін және α=60º максималды (тиімсіз) маңдайлық кедергі күшін жасайды.



Сурет 3.31 – Маңдайлық кедергі күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі



Сурет 3.32 – Тарту күші коэффициентінің Re санына тәуелділігі

3.32-суреттен қозғалмайтын қалақша айналмалы цилиндрге қатыста орналасуының көлбеу бұрышы 60 градус кезде тарту күші коэффициенті ең минималды мәнде, ал 30 градуста ең максималды мәнде болатыны анықталды. Тарту күші коэффициентінің максималды мәні жел энергетикалық қондырғының тиімді жұмыс жасауының көрсеткіші болып табылады [104-109].

3.4 Бөлім бойынша қорытынды

1. Құрамалы қалақшалардың зертханалық үлгілері дайындалды, ары қарай зертханалық зерттеулер жүргізілді.

2. Айналмалы цилиндрлік роторды пайдалану мүмкіндігін зерттеу үшін зертханалық жағдайда жел энергетикалық қондырғысының құрылымында үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының модельдері жасалды.

Эксперименттік зерттеулер жүргізу кезінде:

– айналмалы цилиндрлі және қозғалмайтын қалақшасы бар үш құрамалы қалақшалардан тұратын жел энергетикалық қондырғы әзірленді;

– қозғалмайтын қалақшаның орналасу бұрышы өзгергенде көтеру және маңдайлық кедергі күшінің жылдамдыққа тәуелділігі анықталды;

– қозғалмайтын қалақшаның цилиндрге қатысты 30 градуста орналасқанда Fм.к. = 7,04 Н және Fт. = 2,9 Н орнатылады;

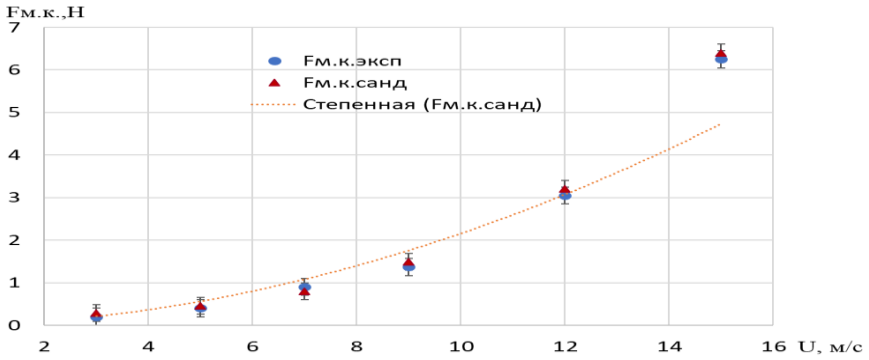
– Рейнольдс санына байланысты маңдайлық кедергі күшінің және көтеру күшінің коэффициенттерінің мәндері α=30 градуста оңтайлы екені анықталды.

4 ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

4.1. Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

Төменде сандық және эксперименттік әдістермен алынған жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшасының аэродинамикалық сипаттамаларының нәтижелері келтірілген.

4.1-суретте маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



Сурет 4.1 – Құрамалы қалақшаның маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі

4.1-суреттен көріп отырғанымыздай, қалақшаның маңдайлық кедергі күшіне тәуелділік сипаты монотонды түрде артады. Ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен қалақшаның аэродинамикалық кедергісі артады.

Маңдайлық кедергі күштерінің сандық деректері дәрежеге тәуелділікпен аппроксимацияланатыны анықталды:

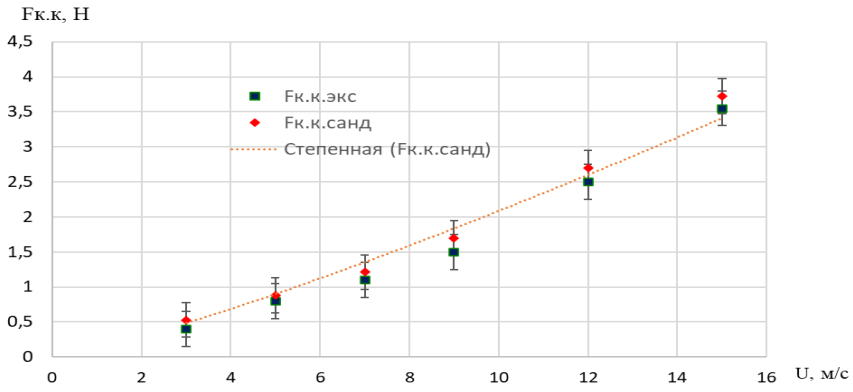
$$F_{м.к} = 0{,}0248\ U^{1{,}9389}.$$

Маңдайлық кедергі күшінің максималды мәндері $F_{м.к.санд}$ = 6,4 Н және $F_{м.к.эксп}$ = 6,25 Н жылдамдық 12 м/с кезінде алынды. Сандық және эксперименттік нәтижелер арасындағы айырмашылық барлық жылдамдық диапазонында минималды болып қалады.

4.2-суретте құрамалы қалақшаның көтеру күшінің салыстырмалы графигі көрсетілген.

4.2-суреттен көрініп тұрғандай, көтеру күші де жүгірмелі ағынының жылдамдығының жоғарылауымен артады, ал көтерукүшінің сандық деректері дәреже функциясымен аппроксимацияланады:

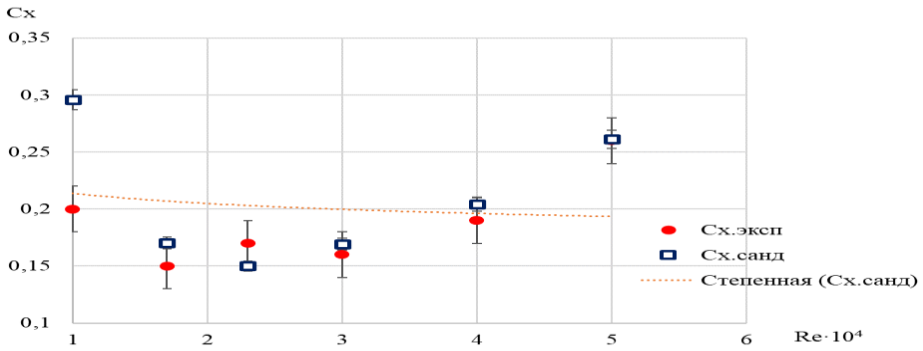
$$F_{к.к} = 0{,}1282\ U^{1{,}2115}.$$



Сурет 4.2 – Құрамалы қалақшаның көтеру күшінің салыстырмалы графигі

Көтеру күшінің максималды мәндері $F_{к.к.санд}$ = 3.72 Н және $F_{к.к.эксп}$ = 3.55 Н құрайды 12 м/с жылдамдықта деректер арасындағы алшақтық минималды болып қалады.

4.3-суретте құрамалы қалақшаның маңдайлық кедергі күшінің коэффициентінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



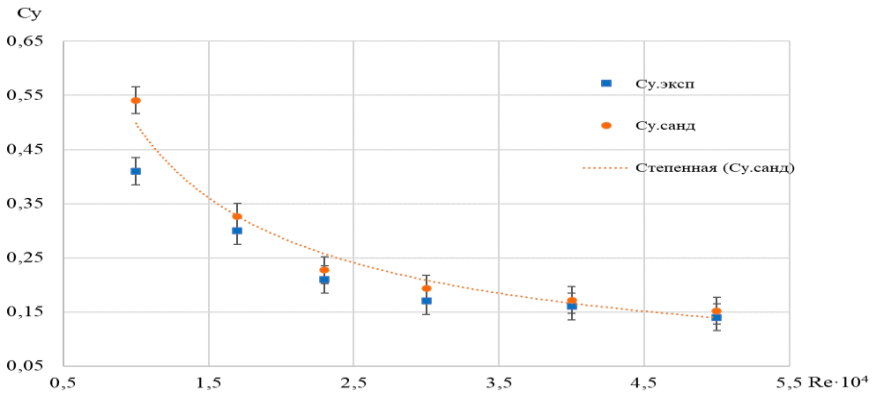
Сурет 4.3 – Құрамалы қалақшаның маңдайлық кедергі күшінің коэффициентінің салыстырмалы графигі

4.3-суретте Рейнольдс санының өсуімен (10000-нан 50000-ға дейін) маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті біртіндеп төмендейтіні көрсетілген.

Тәуелділік сызығының сипаты аэродинамикалық сипаттамаларға тән, өйткені ағын жылдамдығының жоғарылауымен және айналым санының артуымен маңдайлық кедергі коэффициенті төмендейді. Re = 50000 мәнінде эксперименттік маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті 0.26, ал сандық-0.261 тең болады.

Маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті ауа ағынының құрамалы қалақша мен жел доңғалағының бетіне қаншалықты әсер ететінін сипаттайды. Рейнольдстың өсуімен кедергі азаяды, өйткені ауа ағыны жұмыс элементтерінің бетін тегіс айналдыра бастайды, бұл жалпы кедергіні төмендетеді. Деректер Рейнольдс санының өсуімен ұқсас төмендеу тенденциясын көрсетеді, бұл есептеулердің дұрыстығын растайды.

Төменде 4.4-суретте құрамалы қалақшаның көтеру күшінің коэффициентінің салыстырмалы графигі көрсетілген.

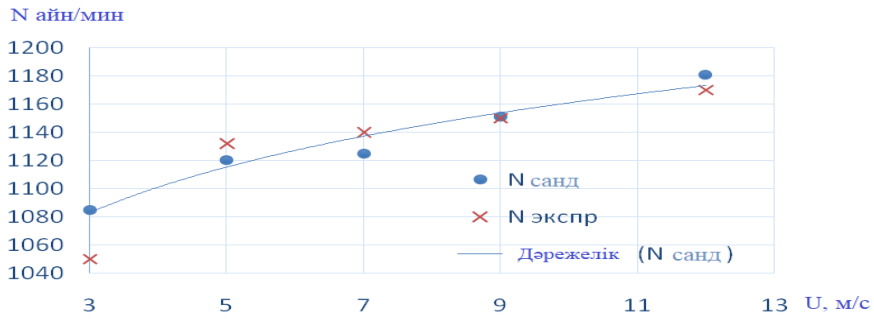


Сурет 4.4 – Құрамалы қалақшаның көтеру күшінің коэффициентінің салыстырмалы графигі

4.4-суреттен көтеру күшінің коэффициенті Re өсуімен де төмендейтінін көруге болады. Эксперименттік деректер 0,41-тен 0.14-ке дейін төмендейді, ал сандық деректер 0,541-ден 0.152-ға дейін төмендейді.

Көтеру күші құрамалы қалақшаның үстіңгі және астыңғы беттері арасындағы қысым айырмашылығынан туындайды. Көтеру күшінің коэффициенті ауа ағынының энергиясынының көтеру күшіне айналдыру тиімділігін көрсетеді.

4.5-суретте құрамалы қалақшаның айналу санының салыстырмалы графигі көрсетілген.



Сурет 4.5 – Құрамалы қалақшаның айналу санының салыстырмалы графигі

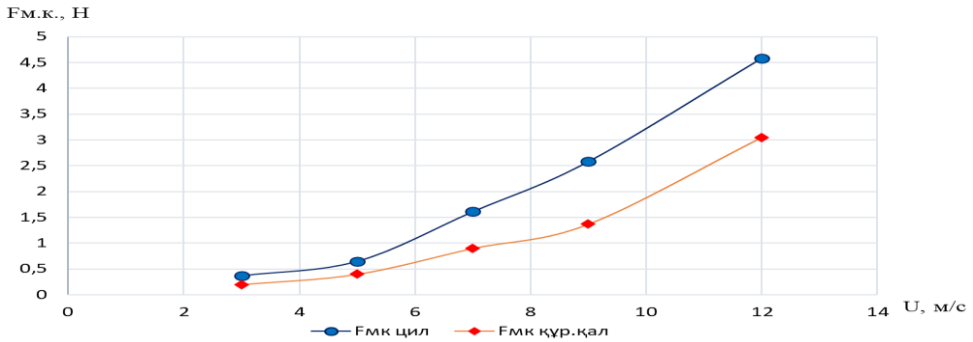
4.5-суреттен ауа ағынының жылдамдығы артқан сайын айналымдар саны да өсетінін көруге болады. 12 м/с жылдамдықта $N_{эксп}$=1170 айн/мин, ал сол кездеN$_{санд}$= 1181 айн/мин.

Айналымдар санының мәніне жүгірмелі ауа ағынының жылдамдығы және қалақшаның сипаттамалары әсер етеді.

Осылайша, графиктер сандық және эксперименттік мәліметтер арасындағы жақсы корреляцияны көрсетеді, шамалы ауытқулармен, бұл

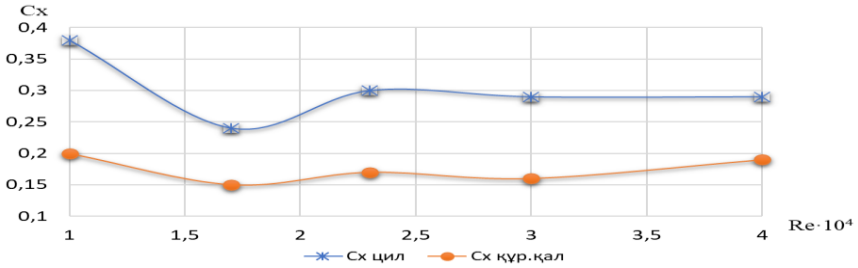
құрамалы қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларын есептеу үшін сандық модельдердің дұрыстығы туралы қорытынды жасауға мүмкіндік береді.

Зертханалық тәжірибелерді жүргізу барысында құрамалы қалақшалы модельмен цилиндрлі қалақшалы модельге салыстырмалы зерттеу үшін эксперимент жасалды. Нәтижесінде тәуелділік графиктер алынды (4.6-сурет).



Сурет 4.6 – Құрамалы қалақша мен цилиндрлі қалақшаның маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі

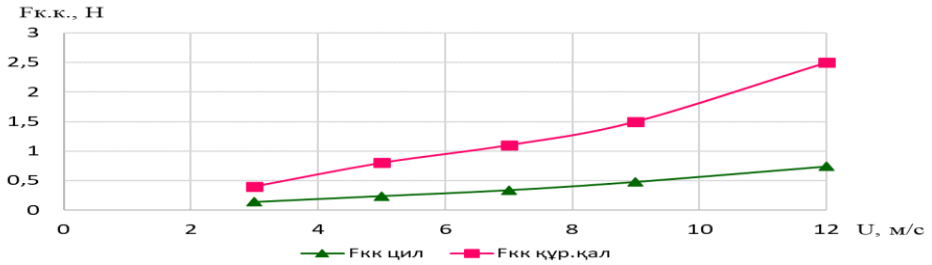
4.6-суреттен көрініп тұрғандай, құрамалы қалақшаның маңдайлық кедергі күшінің мәндері цилиндрлі қалақшамен салыстырғанда төмен. Ауа ағынының жылдамдығы 12 м/с болғанда құрамалы қалақшаның мәні Fм.к.=1.37 Н, ал Fк.к=2.58 Н тең болды. Демек, құрамалы қалақшадағы қозғалмайтын қалақша аэродинамикалық кедергілердің минималды болуын қамтамасыз етеді (4.7-сурет), сонымен қатар желді пайдалану коэффициентінің өсуіне әкеледі.



Сурет 4.7 – Құрамалы қалақша мен цилиндрлі қалақшаның маңдайлық кедергі коэффициентінің салыстырмалы графигі

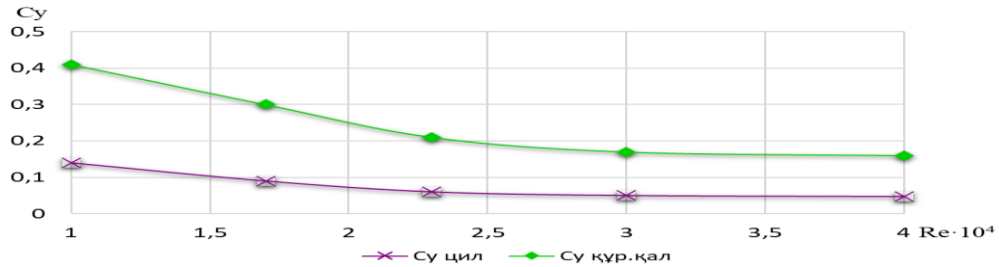
4.7-суретте Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болғанда цилиндрлі қалақшада маңдайлық кедергі коэффициентінің мәні 0.38 тең, ал құрамалы қалақшада 0.2-ға тең болады.

Құрамалы қалақшаның көтеру күшінің мәндері цилиндрлі қалақшамен салыстырғанда жоғары болатыны анықталды (4.8-сурет).



Сурет 4.8 – Құрамалы қалақша мен цилиндрлі қалақшаның көтеру күшінің салыстырмалы графигі

4.8-сурет бойынша 12 м/с кездегі көтеру күштерінің жоғары мәндері: құрамалы қалақшада Fк.к.=1.5 Н, ал цилиндрлі қалақшада Fк.к.=0.48 Н. Құрамалы қалақшаның көтеру күшінің жоғары мәнге ие болуының себебі келесідей түсіндіруге болады: айналмалы цилиндрге қосылған қозғалмайтын қалақша жел доңғалақ қалақшасының профилінің қисаюын күшейтеді. Бұл жағдайда қисықтық қана емес, сонымен қатар қалақшаның тікелей ауданы да артады. Осы көрсеткіштердің өзгеруіне байланысты орай ағу бейнесі толығымен өзгереді. Бұл факторлар көтеру коэффициентінің өсуін анықтайды (4.9-сурет).



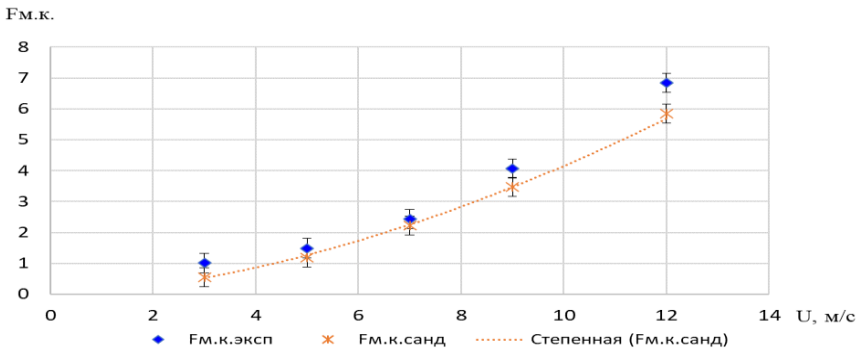
Сурет 4.9 – Құрамалы қалақша мен цилиндрлі қалақшаның көтеру күшінің коэффициенттерінің салыстырмалы графигі

4.9-суреттен көріп отырғанымыздай, құрамалы қалақша Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болған кезде 0.41 мәнін берсе, цилиндрлі қалақшада 0.14 мәніне тең болды.

4.2.Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде екі қалақшалы жел энергетикалыққондырғының аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

Бұл бөлімде сандық және эксперименттік мәліметтерге негізделген екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғының аэродинамикалық сипаттамаларына салыстырмалы талдау жасалады.

4.10-суретте екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



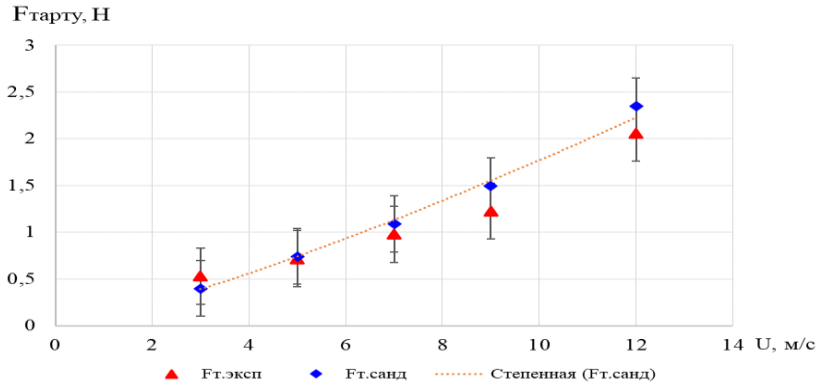
Сурет 4.10 – Екі қалақшалы ЖЭҚ үшін маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі

4.10-суретте ауа ағынының жылдамдығының артуымен екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының маңдайлық кедергі күшінің қалай өсетіні көрсетілген. $F_{м.к.санд}$= 5.84 Н және $F_{м.к.экспр}$ = 6.84 Н мәндері 12 м/с жылдамдықта алынды.

Маңдайлық кедергі күштерінің сандық деректері дәреже функциясымен аппроксимацияланады:

$$F_{м.к.санд} = 0{,}0801 \cdot U^{1{,}7146}$$

Төменде 4.11-суретте екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының тарту күшінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



Сурет 4.11 – Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының тарту күшінің салыстырмалы графигі

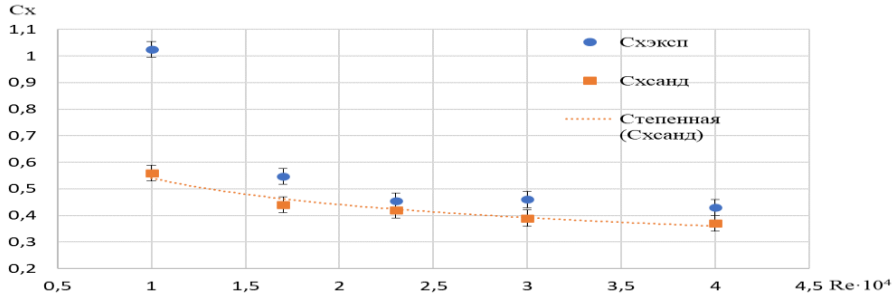
Көріп отырғаныңыздай, 4.11-суреттен тарту күші ағын жылдамдығының жоғарылауымен сызықты түрде өседі. $F_{т.санд}$= 2.35 Н және $F_{т.экспр}$ = 2.06 Н мәндері 12 м/с жылдамдық кезінде алынды.

Қаншалықты тарту күші көтеру күшіне тура пропорционал болса, соншалықты ағын жылдамдығының жоғарылауымен тарту күші артады.

Тарту күші дәреже функциясымен аппроксимацияланатыны анықталды:

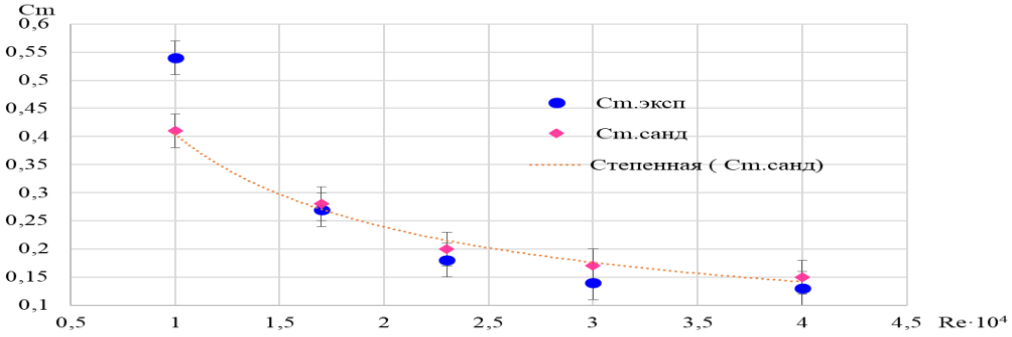
$$F_т = 0{,}0985 \cdot U^{1{,}255}$$

4.12-суретте көрініп тұрғандай, Re жоғарылаған сайын, маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті төмендейді. Re=40000 кезде максималды эксперименттік деректер 0.43, ал сандық деректер 0.37 құрайды. Маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті ауа ағынының жел доңғалағына қандай қарқындылықпен әсер ететінін анықтайды. Ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен қалақшаның пішіні аэродинамикалық тиімдірек болғандықтан, маңдайлық кедергі коэффициенті төмендейді.



Сурет 4.12 – Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі

4.13-суретте екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының кедергі тарту күшінің салыстырмалы графигі көрсетілген.

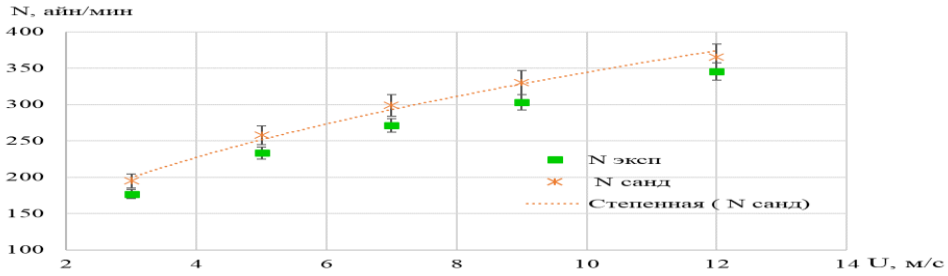


Сурет 4.13 – Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының кедергі тарту күшінің салыстырмалы графигі

4.13-суреттен көріп отырғанымыздай, тарту күшінің коэффициенті Рейнольдс санының өсуімен төмендейді. Эксперименттік жолмен алынған тарту күшінің максималды мәндері 0.54 болса, ал сандық мәні 0.41 тең болды.

Тарту күшінің коэффициенті ауа ағынының энергиясын тарту күшіне айналдыру тиімділігін көрсетеді. Ағын жылдамдығының жоғарылауымен турбуленттіліктің жоғарылауына байланысты тарту коэффициенті біртіндеп төмендейді.

4.14-суреттен жел доңғалағының айналу саны ауа ағынының жылдамдығымен түзу өсетінін көруге болады. U=3 м/с болғанда $N_{санд}$=365 айн/мин, ал $N_{экспр}$=345.4 айн/мин тең болды.



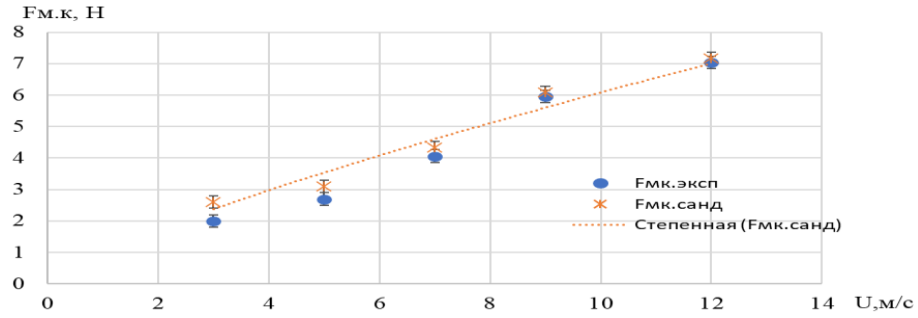
Сурет 4.14 – Екі қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін жел доңғалағының айналымдар санының салыстырмалы графигі

Сандық деректер $N=121,49U^{0,4527}$ дәреже функциясымен аппроксимацияланады және $R^2=0,9907$ детерминация коэффициентімен расталады. Сандық және эксперименттік деректер есептеулердің дәлдігін растайтын оң тенденцияны көрсетеді.

4.3.Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

Сандық және эксперименттік әдістермен алынған үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу нәтижелері келтірілген.

Төменде 4.15-суретте үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі ұсынылған.



Сурет 4.15 – Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі

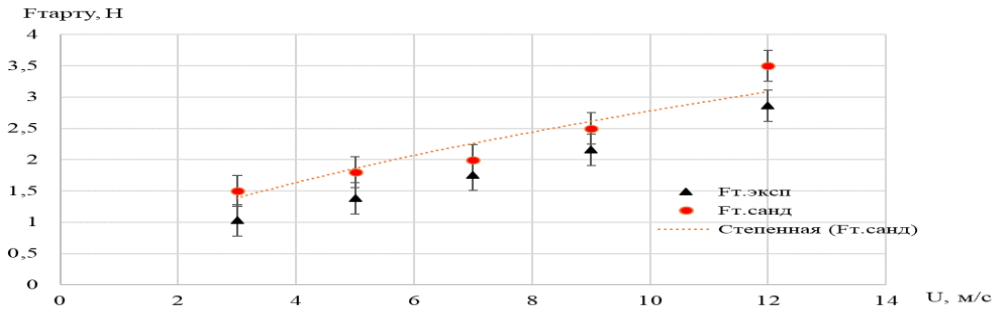
4.15-суреттен көрсетілгендей, U= 3 м/с кезде минималды мәндер $F_{м.к.эксп}$ = 2 Н, ал $F_{м.к.санд}$ = 2.6 Н. Максималды жылдамдықта U= 12 м/с кезде $F_{м.к.эксп}$ = 7 Н, ал $F_{м.к.санд}$ = 7.17 Н.

Сандық деректерді аппроксимациялаудың дәрежелік функциясы:

$$F_{м.к.санд} = 1,0063 \cdot U^{0,7815}.$$

Маңдайлық кедергі күші, ауа ағынының жылдамдығының жоғарылауымен, сондай-ақ жел энергетикалық қондырғысының жұмыс элементтеріне қысым жасайтынауа көлемінің ұлғаюымен өседі.

Төменде 4.16-суретте үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін тарту күшінің салыстырмалы графигіұсынылған.



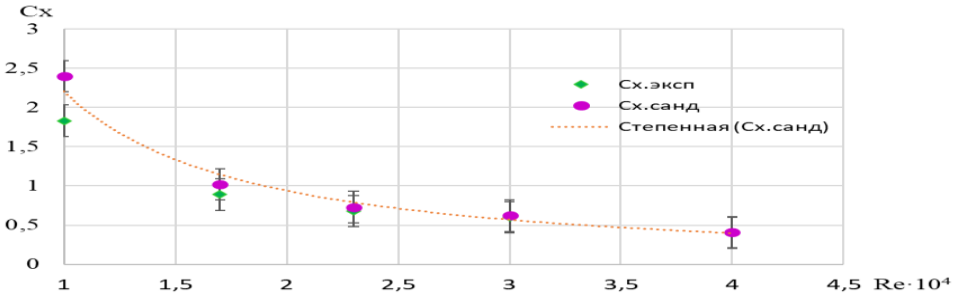
Сурет 4.16 – Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін тарту күшінің салыстырмалы графигі

4.16-суреттен тарту күші ағын жылдамдығының жоғарылауымен монотонды түрде өсетінін көруге болады. U= 12 м/с кезінде F максималды мәндері алынады: $F_{т.эксп}$ = 2.87 Нжәне $F_{т.санд}$ = 3.5 Н.

Сандық деректердің аппроксимациялауфункциясы:

$$F_{т.санд} = 0{,}7337\ U^{0{,}5782}$$

4.17-суретте үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күші коэффициентінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



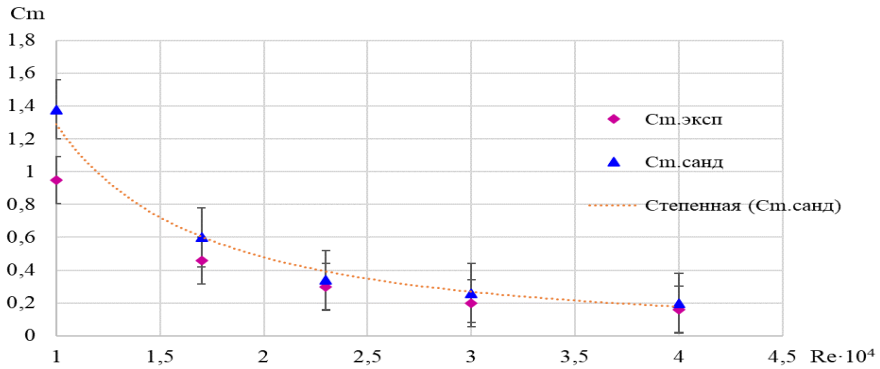
Сурет 4.17 – Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күші коэффициентінің салыстырмалы графигі

4.17-графикте көрсетілгендей, Рейнольдс сандары 10000÷40000 болған кезде ЖЭҚ макетінің маңдайлыққедергі күші коэффициентінің мәні салыстырмалы түрде төмендейді. ЖЭҚ макетінің маңдайлық кедергі күші коэффициентінің сандық және эксперименттік деректерін салыстыру деректердің рұқсат етілген қателік шегінде екенін көрсетеді.

Сандық деректерді аппроксимациялау функциясы:

$$C_{хсанд} = 2{,}2023\ Re^{-1{,}231}$$

4.18-суретте тарту күші коэффициентінің салыстырмалы графигі көрсетілген.



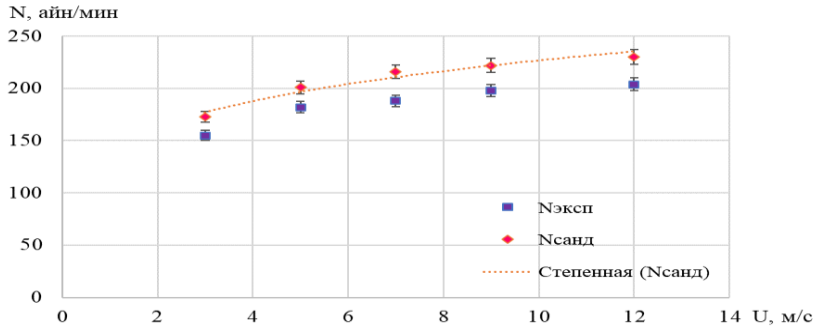
Сурет 4.18 – Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін тарту күші коэффициентінің салыстырмалы графигі

4.18-суреттен алынған нәтижеге сәйкес, ЖЭҚ макетінің тарту күшінің коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі сызығының төмендеуінің монотонды сипатын көруге болады, бұл аэродинамикалық шығындардың төмендеуімен және жоғары жылдамдықта ауа ағынының қалақшаларды орай ағып айналуының жақсаруымен байланысты.

Сандық деректерді аппроксимациялау функциясы:

$$C_{хсанд} = 1{,}2885\ Re^{-1{,}427}$$

Төменде 4.19-суретте үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін жел доңғалағының айналу санының салыстырмалы графигі көрсетілген.



Сурет 4.19 – Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін жел доңғалағының айналу санының салыстырмалы графигі

Алынған 4.19-графикте ағынның жылдамдығы артқан сайын жел доңғалағы білігінің айналу жылдамдығы өсетінін көруге болады.

Сандық және эксперименттік мәліметтердің шамалары кейбір нүктелерде әр түрлі болады, бұл сандық модельдердегі оңайлатулармен және

эксперименттік өлшемдердегі болжамдармен байланысты болуы мүмкін. Деректер арасындағы ең үлкен алшақтық кезінде қателік 3-4% - дан аспайды.

4.4 Бөлім бойынша қорытынды

- Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларына салыстырмалы талдау жасалды.

- Сандық және эксперименттік мәліметтердің шамалары кейбір нүктелерде әр түрлі болады, бұл сандық модельдердегі оңайлатулармен және эксперименттік өлшемдердегі болжамдармен байланысты болуы мүмкін. Деректер арасындағы ең үлкен алшақтық кезінде қателік 3-4% - дан аспайды.

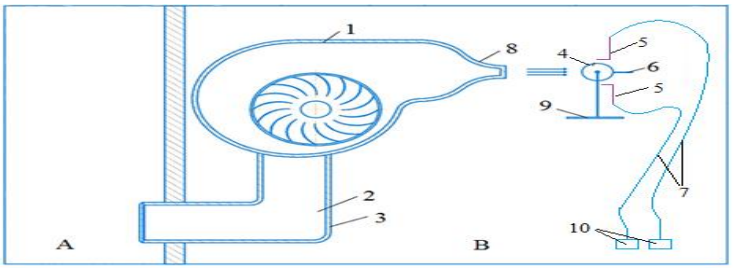
- Зертханалық жағдайда құрамалы қалақшалы мен цилиндрлі қалақшалы макетке салыстырмалы талдау жасау үшін эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Алынған нәтижелер құрамалы қалақшалы цилиндрлі қалақшалы макетке қарағанда тиімді жұмыс істейтінін көрсетті. Құрамалы қалақшадағы қозғалмайтын қалақшаның міндеті – желдің жылдамдығына қатысты айналу жиілігінің жоғарылауына байланысты пайда болатын құйындарды жоюға әкеледі. Соның негізінде қалақшалардағы қысым айырмашылығына байланысты көтеру күшін құруға негізделген.

Айналмалы цилиндрдің көлденең айналуымен қалақшаның бір жағында қысымның төмендеуі және қарама-қарсы жағында қысымның жоғарылауы пайда болады, нәтижесінде көтеру күші пайда болуына әкеледі.

5 ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ҚҰРАМАЛЫ ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАСЫНА АУА АҒЫНЫНЫҢ ЖЫЛУ ФИЗИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

5.1 Жел қондырғысын орай ағу кезіндегі ауа ағыны қысымының өзгеруін анықтау

Жел энергетикалық қондырғысының бетімен таралатын ауа қысымының өзгеру заңдылығын зерттеу мақсатында Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінде, профессор Ж.С. Ақылбаев атындағы инженерлік жылу физикасы кафедрасында «Ағыншаларды зерттеу» зертханасында арнайы қондырғымен (5.1-сурет) тәжірибе жүргізілді.



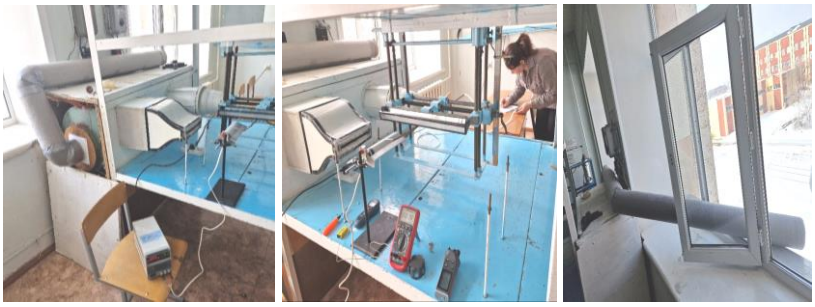
1 – орталықтан тепкіш желдеткіш; 2-ауа өткізгіш; 3-ауа өткізгіштің жылу оқшаулағышы; 4-айналу цилиндрі; 5-Пито түтігі; 6 – қозғалмайтын қалақша; 7-шлангтар; 8-сопло; 9-модель; 10-дифференциалды манометр; А-сыртқы орта; В-зертхана бөлмесі.

Сурет 5.1 – Қондырғының принципиалды сүлбесі:

Қондырғының жұмыс істеу принципі: Желдеткіш *1* қосылған кезде сыртқы ауа *3* ауа өткізгіштің жылу оқшаулағышында *2* ауа өткізгіш бойымен *8* сопло арқылы *4* айналу цилиндрінен және *6* қозғалмайтын қалақшадан тұратын *9* модельге беріледі (сығымдалады). Цилиндрдің үстінде және астында дифференциалды манометрмен *10* қысымды өлшеу үшін шлангамен жалғанған *10* Пито түтігі *5* орнатылады.

Эксперимент нәтижесі дұрыс болуы үшін сыртқы орта температурасының мәні модельге берілгенде өзгерссіз болуы керек. Сондықтан, диаметрі d=125 мм, қалыңдығы δ=10 мм ауа өткізгіштің жылу оқшаулағышы қолданылды. Ол жабық кеуекті құрылымы бар көбікті полиэтиленнен жасалған икемді оқшаулағыш материал, бойлық технологиялық кесіндісі бар күміс-сұр түсті. Ұзындығы 2 м құбырлар түрінде қол жетімді, олар бойлық кесудің арқасында монтаждалған құбырға оңай сырғып кетеді. Оқшаулау қабырғасының оңтайлы қалыңдығы құбырдың диаметріне, оның мақсатына, температуралық жұмыс режиміне байланысты анықталады. Оны ішкі және сыртқы желілер үшін де қолдануға болады.

5.2-суретте эксперимент жүргізуге арналған жұмыс орнының фотосуреті көрсетілген.



а) ә) б)

а) Жазық еркін изотермиялық емес ағынның модельге берілуі; ә) ауа ағыны қысымын өлшеу; б) сыртқы ортадан ауа ағынының кіруі

Сурет 5.2 – Қондырғыдағы тәжірибе көрінісі

Температуралық диапазоны t= – 40°С + 70 °С, жылу өткізгіштік коэффициенті λ = 0,037 - 0,038 Вт/м·К.

Ауа ағысы цилиндр бетімен жанасқанда оның беткі қабатына ағынға қарсы бағытталған қосымша қысым түсіреді. Бұл қысым ауа ағыны бағытының өзгеруімен түсіндіріледі.

Өлшемі бойынша цилиндрға әсер ететін қосымша қысым күшіне тең болатын, цилиндр жақтан ауа ағынына қарсы күш көрсетіледі.

Қарсыласу күші дененің пішініне тәуелді болғандықтан, оны пішін қарсыласуы деп атайды.

Ауа ағыны мен цилиндрдің салыстырмалы қозғалысы кезінде пайда болатын *толық қарсылас*у күші келесі формула бойынша анықталады:

$$F = F_{давл} + F_{тр}, \tag{7.1}$$

мұндағы

$F_{давл}$ - қысым қарсыласуы;

$F_{тр}$ - үйкеліс қарсыласуы.

Толық қарсыласу *Ньютон формуласы* бойынша анықталады:

$$F = C\omega\rho\frac{v^2}{2}, \tag{7.2}$$

мұндағы

C - қарсыласу коэффициенті;

ω - дененің сипаттамалық ауданы;

ρ - ауа тығыздығы;

v - сипаттамалық жылдамдық.

Қысым қарсыласуы келесі формула бойынша анықталады:

$$F_{давл} = C_д \omega \rho \frac{v^2}{2}, \qquad (7.3)$$

мұндағы

$C_д$ - қысым қарсыласуының коэффициенті;

ω - дененің миделдік қиылысу ауданы.

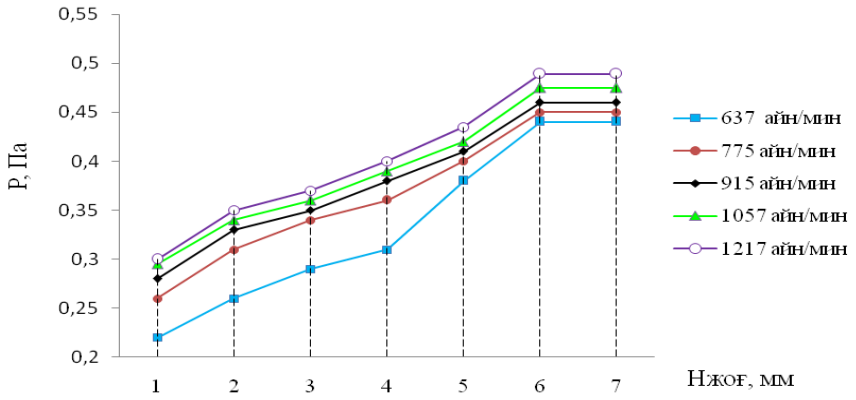
Дененің миделдік қиылысуы – қозғалыс бағытына перпендикуляр, дененің жазықтықтағы кескіні.

5.2 Зерттеу нәтижелері мен салыстырмалы талдау

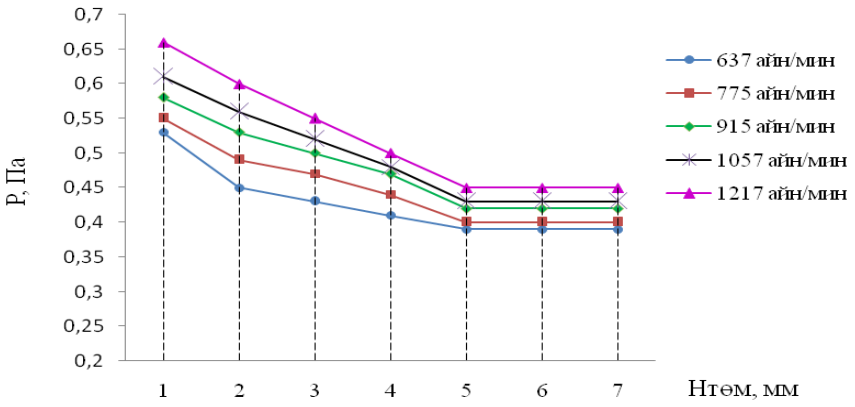
Жазық еркін изотермиялық ауа ағыны цилиндрді орай ағуы кезінде ауа қысымының таралу заңдылығы зерттелді. Қысым пито түтігіне қосылған цифрық дифманометр көмегімен өлшенді. Пито түтікшесі цилиндрдің жоғарғы бетінен бастап 1 мм-ден 7 мм дейін жоғары қарай және цилиндрдің астынан 1 мм-ден 7 мм дейін төменге қарай қою арқылы қысымның мәндері алынды. Нәтижесінде қалақша айналу жиілігінің жел энергетикалық қондырғы бойымен қысымның таралуының әсері және әр ауа қабатына тәуелділік графиктері мен модельдеу негізіндегі суреттері алынды (5.3, 5.4-суреттер).

5.3-суретте ауа қысымының цилиндр бетінің үстінде таралуының ерекшелігі көрсетілген. Цилиндрдің айналу саны N=637 айн/мин кезінде 1 мм биіктегі қысымның мәні P=0,22 Па, ал 7 мм биіктікте P=0,44 Па. Демек, ауа ағыны цилиндрдің үстінен орай аққанда қысым минималды мәнде болады. Себебі, қалақша қозғалып жатқанда, ауа ағынына қарсы бағытталған қосымша қарсыласу күші пайда болады [110].

5.4-суретте цилиндр бетінің астында ауа ағынының қысымы таралуының көрінісі нәтижесі ұсынылған. Цилиндрге жақын аумақта қысым мәні үлкен, ал алыстаған сайын азаяды. Өйткені, жылдамдықты арттырған кезде қайтарылмалы ағыстың аумағы үлкейді де одан үлкен құйын пайда болады. Ары қарай құйын ағып жатқан денеден бөлініп, ағыс бойымен төмен ағып кетеді. Оның орнына тура солай бөлініп кететін жаңа құйын пайда болады.



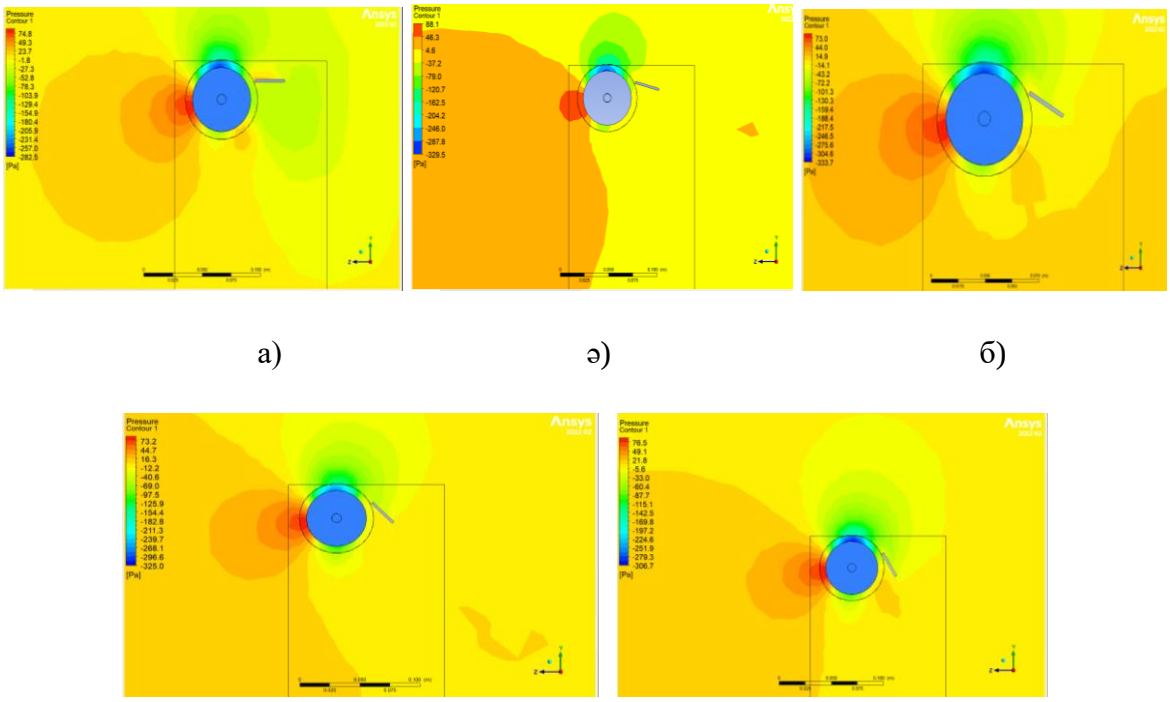
Сурет 5.3 – Цилиндр бетінен жоғарғы бөлігі кезінде құрамалы қалақшаның айналу жиілігінің ауа ағынының қысымына әсері



Сурет 5.4 – Цилиндр бетінің төмен бөлігінде таралу кезінде құрамалы қалақшаның айналу жиілігінің ауа ағынының қысымына әсері

Денеден кейін құйындардың пайда болуы цилиндрдің арты жағындағы қысым (қарсыласу), бірқалыпты ауа ағынының қысымымен салыстырғанда күрт төмендеуіне әкеледі [111].

Демек, ауа ағынының қысымы максималды мәнге ие болады. Цилиндр астында қысымның жоғары болуынан көтеру күші артып, цилиндрдің қозғалысына алып келеді.



а) ә) б)

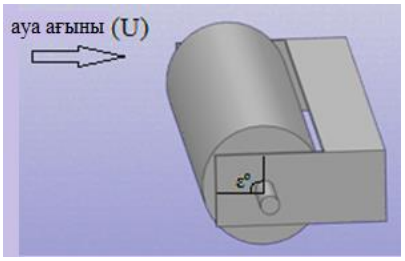
в) г)

а) 0 градус; ә) 15 градус; б) 30 градус; в) 45 градус; г) 60 градус

Сурет 5.5 – Құрамалы қалақшаны ауа ағыны орай ағуы кезіндегі қысымның таралуын модельдеу

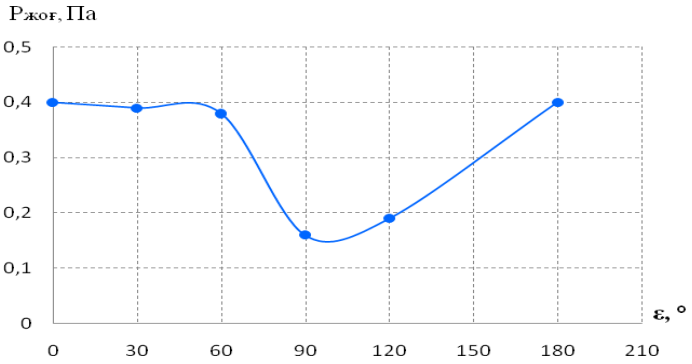
Модельдеу нәтижесінде қысымның таралуының өзгерісін көруге болады. Қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты α=0º, 15º, 30º, 45º, 60º- қа орналасқанда, қысымның мәні қалақшаның жоғарғы бетінде ең максималды көрсеткішке 30º -та ие болады.

Қалақшаның жоғарғы және төменгі бөлігінде ауа ағынның қысымының таралуына салыстырмалы талдау [112] жүргізілді. Жұмыста [112] газ ағынындағы айналмалы цилиндр бойымен қысымының таралуы зерттелген. Біздің жағдайда қалақша бойымен қысымының таралуын зерттеу (қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндр) ауа ағынында жүрді (5.6-сурет).



Сурет 5.6 – Цилиндрді орай аққан ауа ағыны қысымының таралуы

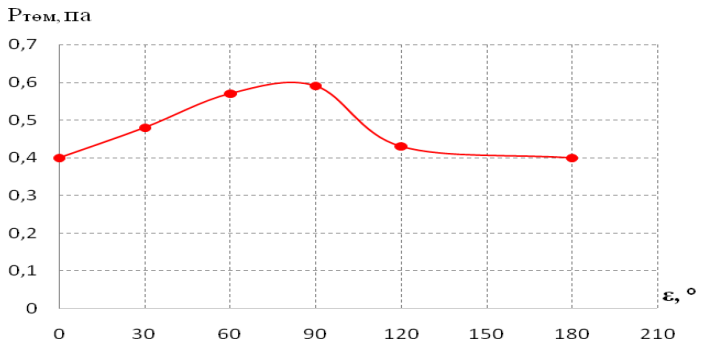
Цилиндр бетінің жоғарғы және төменгі қабатындағы қысымның таралуын зерттеудегі тәжірибелеріміздің нәтижелері 5.7 және 5.8 суреттерде келтірілген.



Сурет 5.7 – Re=3.3·10^4 кезінде қалақша жоғарғы беті бойынша қысымның сағат тілімен таралуы

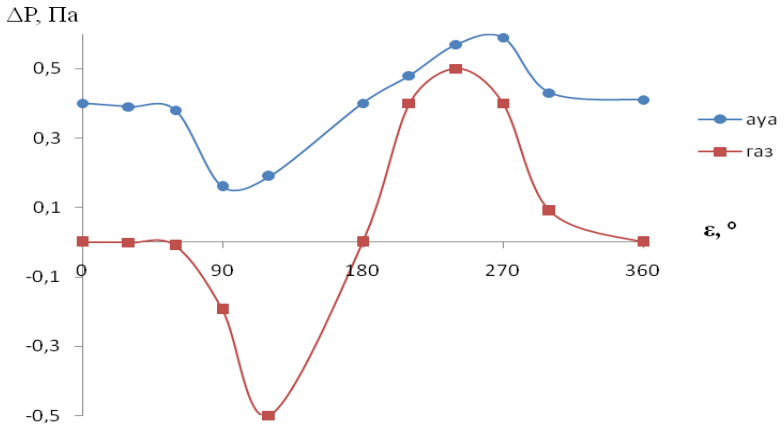
Осы тәжірибелерден (5.7-сурет) U жылдамдығының құрамдас бөлігінің пайда болуына байланысты қысымның бастапқы мәні төмендейтінін көруге болады, ал үзілу аймағында ағынның барлық артқы аймағында сирету мәні бірдей.

5.8-суреттен қалақша бетінің төменгі қабатында қысымның жоғарылауы байқалады. Оның негізінде көтеру күші пайда болады, бұл қалақшаның қозғалысын тудырады.



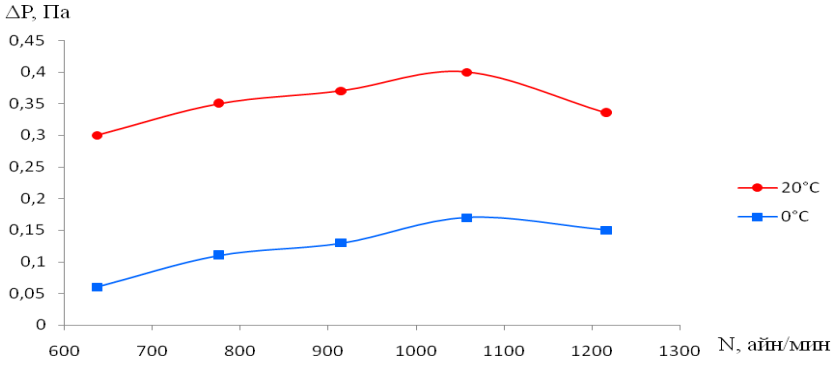
Сурет 5.8 – Re=3.3·10^4 кезінде қалақша төменгі беті бойынша қысымның сағат тіліне қарсы таралуы

5.7 және 5.8-суреттерде алынған екі графикте көрсетілген жоғарғы беттегі қысымның таралуы төменгі бетке қарағанда аз, бұл ғылыми жұмыс [112]. нәтижелеріне сәйкес келеді (5.9-сурет).



Сурет 5.9 – Цилиндрді ауа ағыны мен газ орай ағуы кезіндегі қысым таралуының салыстырмалы тәуелділігі

Цилиндрді орай ағатын ауа ағынының температурасы өзгергенде қысым өзгерісінің мәндері 5.10-суретте көрстеілген.



Сурет 5.10 – Ауа ағыны температурасының мәндері t=0 °C және t=20 °C кезінде қалақшаның айналу жиілігіне байланысты қысымның өзгеруі

5.10-суретте көрсетілгендей, ауа ағынының температурасы жоғарылағанда қысым өзгерісінің мәні де қалақшаның айналым саны артқан сайын жоғарылайды. Ауа ағынының температурасы t=0 °C кезінде ауаның ылғалдылығы 40 % және тығыздығы ρ=1,2920 кг/м^3, ал t=20 °C кезінде ылғалдылық 44 % және тығыздығы ρ=1,2041 кг/м^3.

5.3 Бөлім бойынша қорытынды

- Көлденең осьтік құрамалы қалақшаның жұмысы кезінде ауа ағынының қысымының өзгеруі зерттелді.
- Құрамалы қалақшаның айналу жиілігінің цилиндр бетіндегі ауа ағынының қысымына әсері анықталды.
- Ауа ағынының температурасы өзгерген кезде қысымның өзгеруінің тәуелділігі алынды.

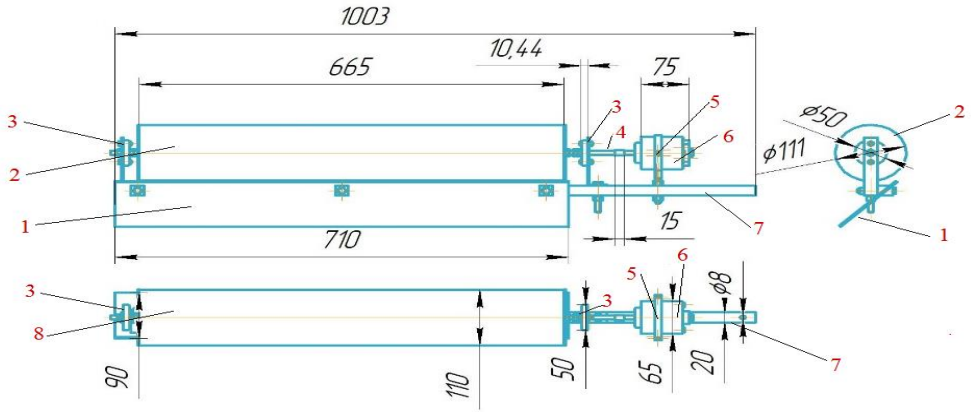
6. КӨЛДЕНЕҢ АЙНАЛУ ОСІ БАР ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫН СЫНАУ НӘТИЖЕЛЕРІ

6.1 Құрамалы қалақшалары бар жел энергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісін әзірлеу және құрастыру

Ауалы ағынның желдік энергиясының электр энергияға айналу үрдісін зерттеу үшін ауа ағынының энергиясын қолдануды анықтауға және бағалауға болатын, айналмалы жүйеден зертханалық шарттарда желқозғалтқышының арнайы тәжірибелік – өнеркәсіптік үлгісі құрылды. Айналмалы цилиндрлер түрінде қозғалмайтын қалақшалары бар жел энергетикалық қондырғыларға жатады.

Құрамалы жел қондырғысының сипаттамалары мен параметрлерін тез жүрістілікке байланысты айналмалы момент пен жел энергиясын қолдану коэффициентінің өзгерісін көрсетіп тұратын аэродинамикалық сипаттамалардың көмегімен салыстыру қолайлы.

Көлденең осьті құрамалы айналмалы цилиндрлер түріндегі желқозғалтқышының тәжірибелік үлгісінің сүлбесі, сондай-ақ «Баламалы энергетика» ғылыми-зерттеу орталығының зертханасында құрастырылған қозғалмайтын қалақшасы бар цилиндрлі жел қондырғысы көрсетілген (6.1 - 6.3 сурет).

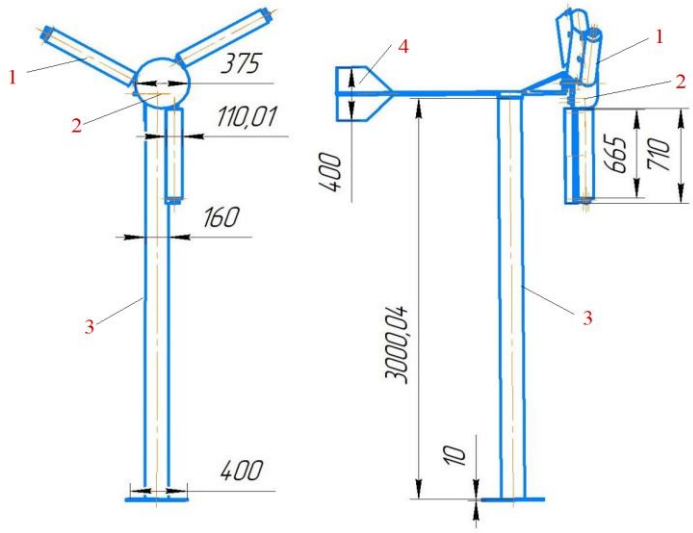


1-қозғалмайтын қалақша; 2 – айналмалы цилиндр; 3 – мойынтірек (подшипник); 4 – муфта; 5 – электр қозғалтқыш бекітпе; 6 – электр қозғалтқыш, 7 – бекітілетін негіздер; 8 – құрамалы қалақша (қозғалмайтын қалақша мен айналмалы цилиндрлердің бүйір беті)

Сурет 6.1 – Көлденең осьті бағытта айналатын құрамалы қалақшаның өлшемдері мен сұлбасы

Құрамалы айналмалы цилиндрлер түріндегі қалақшалары бар жел энергетикалық қондырғысы құрамалы айналмалы цилиндр 2, және 7 негіздерге бекітілген, қозғалмайтын қалақшадан 1 тұрады. Айналмалы цилиндр 2 подшипникке 3 орнатылады және муфта 4 арқылы электр қозғалтқышымен 6 қозғалады.

Сурет 6.2 – Көлденең осьті бағытта айналатын құрамалы қалақшалар



1-құрамалы қалақша; 2-генератор; 3-діңгек;
4- жел доңғалағын желге бағыттап орнатуға арналған қауырсынды құйрық

Сурет 6.3 – Айналмалы цилиндрлер түрінде көлденең айналатын осьті құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелік үлгісінің сүлбесі

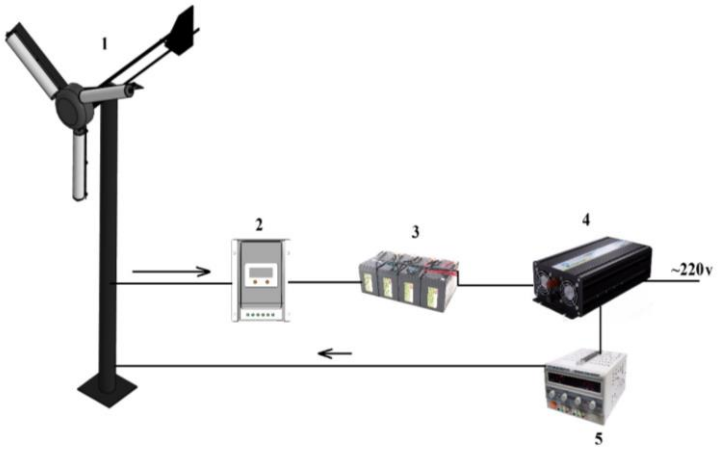
Цилиндрлер айналуы үшін щеткалы-коллекторлы механизм арқылы қозғалтқышқа электр тоғы (кернеу) беріледі. Коллектор білікке бекітілген және одан оқшаулағыш материал арқылы оқшауланған. Коллектордан кейін ток цилиндрлік қалақшаларды айналдыруға әкелетін генераторға бағытталады.

Цилиндрлер жартылай өткізгішті электроника негізінде электргенератор арқылы айналымға әкелінді.

Осылайша, жоғарыда айтылғандарды негізге ала отырып, «Баламалы энергетика» ғылыми-зерттеу орталығының зертханасында құрылған, көлденең бағытталған қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндрлер түріндегі тәжірибелік жел энергетикалық қондырғысы әзірленді.

Көлденең осьті құрамалы айналмалы цилиндрлер мен қозғалмайтын қалақша түріндегі жел қондырғысының тәжірибелік үлгісінің сүлбесі, сондай-ақ «Баламалы энергетика» ғылыми-зерттеу орталығының зертханасында

құрастырылған қозғалмайтын қалақшасы бар цилиндрлі жел қондырғысының сынақ палигондағы фотосы көрсетілген (6.4 және 6.5 сурет).



1- жел қондырғысы, 2-контроллер, 3-аккумулятор, 4-инвертор, 5-қоректендіру блогы

Сурет 6.4 – Көлденең осьті құрамалы айналмалы цилиндрлер түріндегі ЖЭҚ тәжірибелік үлгісінің сүлбесі

Құрастыру кезінде келесі мақсаттар қойылды: 1 – құрылымды қарапайымдау, 2 – өзіндік құнын төмендету, 3 – қауіпсіздік пен сенімділікті жоғарлату. Есептеулер бойынша желдің күші төмен болғанда, статорлық орам шамамен 12-24 В болмашы ЭҚК тудыруы мүмкін. 220 В деңгейге ЭҚК-нің сәйкес келмеуі, үлкен емес өлшемді желқозғалтқышын кеңінен енгізу үшін негізгі кедергі болды.

Сурет 6.5 – Тәжірибе жасау үшін сынақ полигонында ЖЭҚ орнату

Әртүрлі жел кезінде ЭҚК-ін тудыратын амплитуда мен жиілік өзгеріп отырады. Бұрынғы белгілі желгенераторларының моделдерінде айнымалы параметрлерді тұрақтандыру механикалық немесе гидравликалық тораппен

жүзеге асырылатын. Бұл төмен ПӘК-ке және желгенераторларының салмағы мен өлшемінің жоғарлауына әкелді [113].

Сондықтан, жаңа технологиялық шешім табылды – айнымалы шамаларды тұрақтандыру күштік жартылай өткізгішті электрониканың негізінде жасалды. Төменгі вольтты кернеуді ±24 В – тан ~ 220 В – қа дейін түрлендіру тұрақты кернеуді 50Гц жиілікпен айнымалы 220В-қа дейін жартылай өткізгішті түрлендіргіш (инвертор) негізінде жүзеге асырылды.

Жел доңғалағының жалпы диаметрі 1,8 м. Көлденең білік диаметрі 25 мм болат шыбықтан жасалған және генератордың айналу осі болып табылады, генератор мачтаның жоғарғы аймағына орнатылады. Радиалды диск қалыңдығы 10 мм болат табақтан жасалған. Дөңгелек дискінің диаметрі 250 мм. Қалақшалардың айналмалы емес түбірлік бөліктері бір-біріне қатысты 30 градус бұрышта радиалды дискіге бекітілген. Жел қондырғысының айналмалы цилиндрлік бөліктері диаметрі 150 мм болатын көлденең бағытта орнатылған үш цилиндрінен жасалған және қозғалмайтын қалақшасының ұзындығы 0,71 м, айналмалы цилиндрдің ұзындығы 0,69 м.

Жел қондырғысы келесідей жұмыс істейді (6.5-сурет): электр кернеуі щеткалы-коллекторлық торап арқылы электр қозғалтқыштарына қосылған кезде, олар қозғалмайтын қалақшасы бар цилиндрлерді айналдырады. Цилиндрлер бағыты бойынша синхронды түрде және бірдей жылдамдықпен айналады [114]. Айналмалы цилиндрлердің ауа ағындары ағып жатқанда, радиалды диск пен генератор білігін айналдыратын көтеру күші пайда болады. Генератор білігі айналған кезде электр энергиясы өндіріледі [115].

Дәстүрлі қалақшалармен салыстырғанда, желдің аз жылдамдығы кезінде құрамалы айналмалы цилиндрлер түріндегі қалақшалардың көтеру күші көп.

Ұсынылған құрылғы тұтынушыларды электр энергиясымен қамтамасыз етуге арналған ауа ағынының төмен жылдамдықтарында жұмыс істей алатын жел энергетикалық қондырғыларында жел доңғалақтарын пайдалануға ықпал етеді. Ұсынылып отырған құрылым желдің кенеттен қатты екпіні кезінде сынудан қауіпсіздікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Әзірленген құрамалы айналмалы цилиндрлер түріндегі жел энергетикалық қондырғының негізінде патентке өтінім беріліп, 2024 жылғы ақпанда алынды [116]: «Құрамалы қалақшалары бар көлденең осьтік жел электр қондырғысы» 14.02.2024 ж. № 9072 пайдалы модельге Патент.

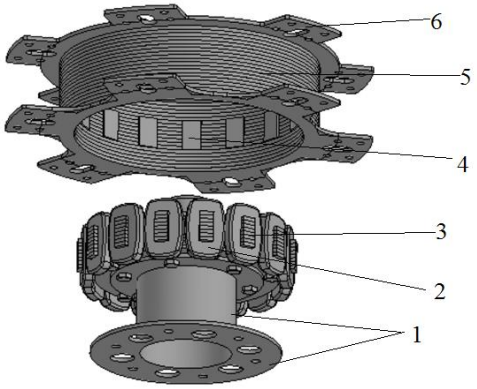
6.2 Көлденең айналу осі бар жел қондырғысна арналған электр генераторы

ЖШС «Tree Energy» инженерлерімен бірлесіп көлденең айналу осі бар ЖЭҚ үшін үш фазалы электр генераторы әзірленді және құрылды (6.6-сурет).

Сурет 6.6 – Үш фазалы синхронды айнымалы ток генераторының құрылымы

Қарастырылып отырған генератор ротор түріндегі айналмалы элементтен және қозғалмайтын элемент – статордан тұрады.

Сақинада 14 тұрақты магнит бар. Үш фазалы орам статор саңылауларында орналасқан. 15 оралған айнымалы ток катушкалары - бұл статор өзегінің ойықтарына белгілі бір жолмен салынған сымдар жүйесі (24 дана). Генератор роторы жоғарғы және төменгі қақпағы бар корпустан, сыртқы сақиналардан және магниттері бар сақиналардан тұрады. Статор шайбалардың көмегімен негізге бекітіледі. Мыс сымның диаметрі 1 мм. Бір орамдағы бұрылыстардың саны 70. Есептеулер бойынша, бұл 24 орам жел доңғалағы 230 айн/мин айналу жиілігінде 950 Вт-қа дейін қуат өндіре алады. Ротор түйін мойынтірегі арқылы айналады. Сымдарды дұрыс орналастыру үшін пластина пайдаланылады (6.7-сурет).



1 – генератор (статор негізі); 2 – катушка; 3 – жүрекше; 4 – магниттер; 5 – статор; 6 – қалақшаларды бекіту

Сурет 6.7 – Генератор жинағы

Синхронды электр генераторының жұмыс принципі электромагниттік индукция құбылысына негізделген. 14 магниті бар ротор үш фазалы статор орамын кесіп өтетін және ондағы электр қозғаушы күшін тудыратын айналмалы магнит өрісін жасайды. Жүктеме генераторына қосылған кезде генератор айнымалы ток көзі болады.

Индукцияланған ЭҚК деңгейіне катушканы орауға арналған сым сақинасының диаметрінің әсерін зерттеу үшін эксперименттер жүргізілді.

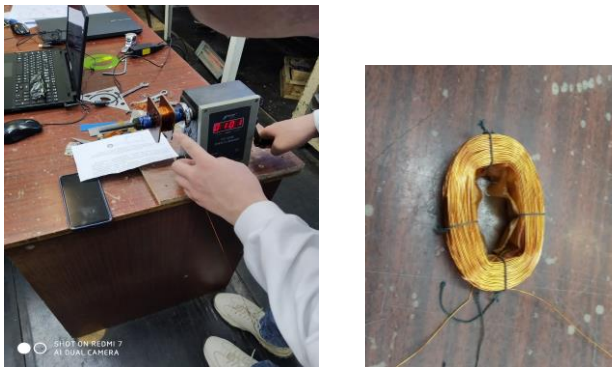
Әртүрлі диаметрлі мыс сымдармен орамды орау үшін үш нұсқа қарастырылды (6.1-кесте).

Кесте 6.1 – Зерттелетін катушка үлгілерінің параметрлері

Үлгілер	Бұрылыстар саны, N	Сымның диаметрі, d, мм	ЭДС, ε, В
1	340	1,2	3,4
2	380	1	2,5
3	530	0,6	2,1

Бірінші үлгі оңтайлы екені анықталды, өйткені бұл катушканы өлшеу кезінде ең жоғары кернеу мен ең аз ток мәні алынды.

Генератордың фотосуреті және генератордың катушкасын орау процесі, диаметрі 0,6 мм мыс сымнан тұрады. Бұрылыс есептегіші бар қаңқасыз катушкаларды орау үшін машина қолданылды, кейіннен жіптермен нығайтуға арналған ойықтары бар (6.8-сурет).

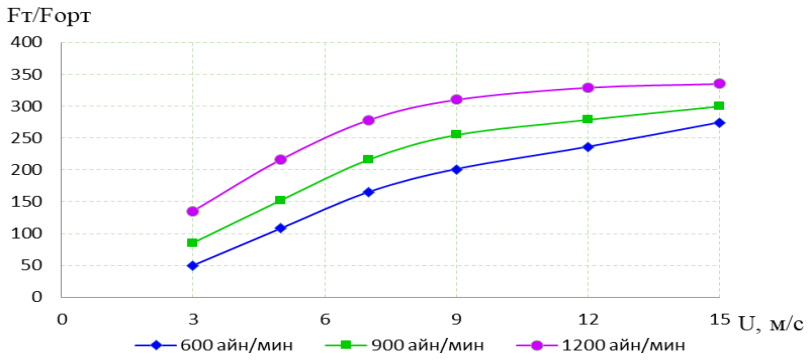


Сурет 6.8 – Оңтайлы катушка үлгісі

Сымның диаметрін одан әрі ұлғайту жөн емес, өйткені үлкен диаметрлі сыммен орау кезінде ол сызықтық параметрлерге генераторға сәйкес келмейді, сонымен қатар электр қозғаушы күштің мәнінің төмендеуі байқалады.

6.3 Көлденең бағыттағы құрамалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық және электрфизикалық параметрлерін зерттеу нәтижелері

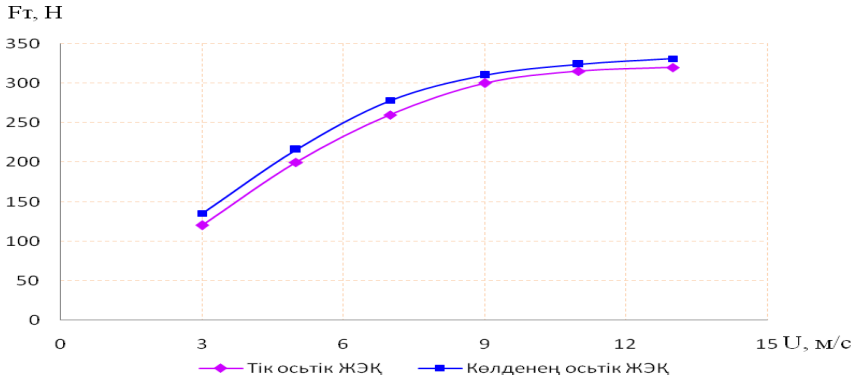
Көледенең бағыттағы құрамалы желэнергетикалық қондырғылардың тәжірибелі-өнеркәсіптік үлгісін кешендік құру, технологиясын жасау, теориялық және тәжірибелік зерттеу бойынша жел қозғалтқышының аэродинамикалық сипаттамаларын анықтау бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Жел доңғалағының D=1,8 м диаметрлі тәжірибелік үлгісінің тарту күшінің жел ағынының жылдамдығынан тәуеділігі зерттелді (6.9 - сурет).



Сурет 6.9 – Тарту күшінің ауа ағын жылдамдығына тәуелділігі

Тәуелділіктен цилиндрдің айналу саны 600 айн/мин кезінде ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болғанда тарту күшінің мәні 274 Н максималды артқанын байқаймыз, ал айналым саны 900 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәні 300 Н-ға тең және айналым саны 1200 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәнің максималды 335 Н артқанын көреміз. Яғни айналым саны артқан сайын, тарту күшінің артатыны байқалады [117, 118].

Көлденең бағыттағы құрамалы жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикасын тік бағыттағы құрамалы жел энергетикалық қондырғысымен салыстыру жүргізілді (6.10-сурет).

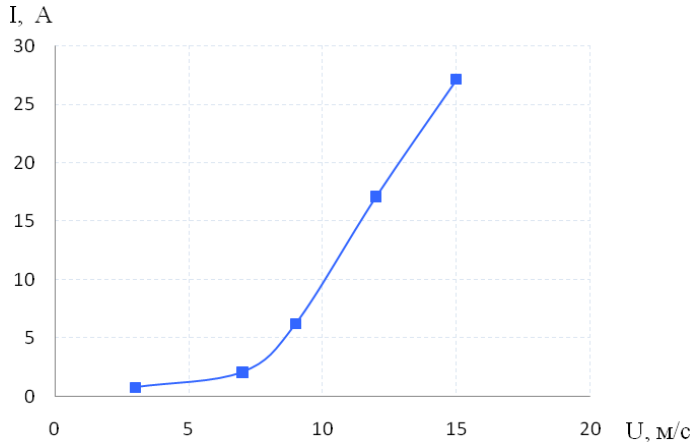


Сурет 6.10 – Көлденең және тік бағыттағы ЖЭҚ 1200 айн/мин кездегі тарту күшінің ауа ағын жылдамдығына тәуелділігі

6.10-суретте көрсетілгендей, көлденең бағыттағы ЖЭҚ жел доңғалағының айналу жилігі 1200 айн/мин кезде ауа ағынының жылдамдығы 3-13 м/с болғанда тарту күшінің мәні 135-331 Н дейін максималды артқанын байқаймыз, ал тік бағыттағы бағыттағы ЖЭҚ жел доңғалағының айналу жилігі 1200 айн/мин кезде 3-13 м/с болғанда тарту күшінің мәні 120-320 Н дейін максималды артқаны көрінеді. Салыстырмалы талдау бойынша тік бағыттағы ЖЭҚ қарағанда көлденең бағыттағы ЖЭҚ тарту күші 1 % жоғары екендігі анықталды.

Көлденең осьті айналмалы цилиндрлер түріндегі құрамалы желқозғалтқышы қондырғысының тәжірибелік үлгісінің электрфизикалық және жылуфизикалық параметрлерін анықтау бойынша полигонда бірқатар аэродинамикалық сынақтар жүргізілді.

Тәжірибелік жел энергетикалық қондырғы үшін желдің күшеюі және генератордың айналымының арттыру кезіндегі вольт-амперлік сипаттамалары көрсетілген (6.11 – сурет). Жүктемеге қосылған, генератордың жұмыс нүктесі максималды қуат нүктесіне сәйкес келеді. Мұндай жүктемелерді қосу жүйенің жұмыс нүктесін минималды немесе тіпті нөлдік қуат аймағына жылжытуы мүмкін. Сондықтан жүйенің маңызды құрамдас бөлігі – жел модулін жүктememен үйлестіре алатын, кернеу түрлендіргіштері болып табылады.



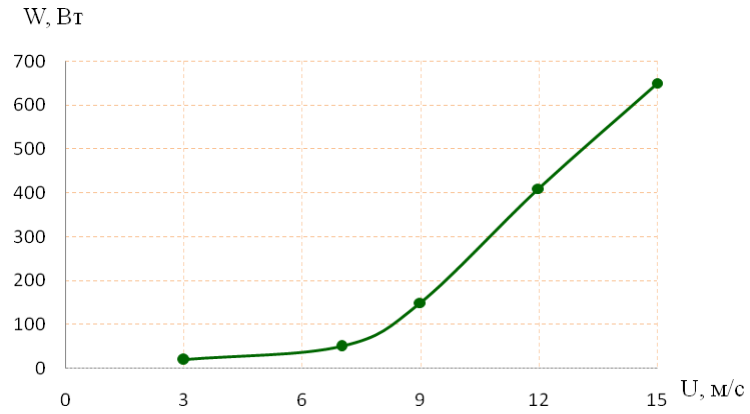
Сурет 6.11 – Құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелік үлгісінің ток күшінің жел жылдамдығына тәуелділігі

Жел электр станциясының қуаты, кернеу, ток және білік жылдамдығы бүкіл жүйеге энергия беретін желдің жылдамдығына байланысты. Желдің жылдамдығы жоғарылаған сайын пайда болатын кернеу мен ток өседі (6.11-сурет).

6.12-суретте желдің жылдамдығынан тәуелді тоқ пен кернеудің алынған эксперименттік анықталған мәндерінің, жел энергетикалық қондырғының тәжірибелік үлгісінің қуатына тәуелділігі көрсетілген. Айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіру жартылай өткізгіш түзеткіштің көмегімен жүзеге асырылды [119].

Тұрақты ток қуаты есептелді: W=UI, мұндағы U-генератордың шығысындағы кернеу, В; I – тізбектегі ток, А. Жел жылдамдығының жоғарылауымен өндірілетін қуат сызықтық түрде өседі, ал 15 м/с жылдамдықта жел энергетикалық қондырғысы 650 Вт номиналды қуат береді.

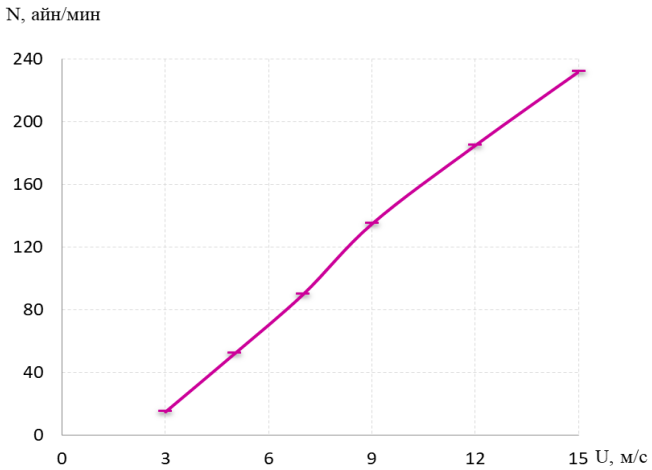
Генератордың номиналды кернеуі тұрақты ток кезінде 24 В құрайды, ал жел инверторының көмегімен 220 В айнымалыға айналдырдық.



Сурет 6.12 – Құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелі үлгісінің қуатының жел жылдамдығына тәуелділігі

Осылайша, желқозғалтқышы 3÷15 м/с табиғи желдің жылдамдық диапазонында сыналды және осы диапазон үшін әртүрлі жүктемелер кезіндегі электрфизикалық параметрлері (қуаты мен ток күші) анықталды. Берілген құрамалы желқозғалтқышының айналмалы цилиндрінің сыналған моделі әртүрлі климаттық жағдайларда табиғи аз жел жылдамдықтарында 3 – 4 м/с бастап қолданыла алады.

6.13-суретте жел энергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісінің айналу жиілігінің жел жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген.



Сурет 6.13 – Құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелі үлгісінің айналу жиілігінің жел жылдамдығына тәуелділігі

6.13-суреттен желдің жылдамдығының артуы минутына жел доңғалағының айналу санының сызықтық өсуіне әкелетінін көруге болады. Бұл желдің жылдамдығының жоғарылауымен қозғалмайтын қалақшасы бар айналмалы цилиндрлерге әсер ететін көтеру күші сызықты түрде артады.

Осылайша, көлденең осьті айналмалы цилиндрлер түрінде құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелік үлгісінің вольт-амперлік сипаттамалары, жел

энергетикалық қондырғысының қуаты, ток және білік жылдамдығы желдің жылдамдығына тәуелділігі алынды. Жел доңғалағының айналу жиілігі 232 айн/мин, желдің жұмыс жылдамдығының ең төменгі шегі-8-9 м/с.

6.4 Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең бағытта айналатын құрамалы жел энергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісін сынау және жылуфизикалық параметрін анықтау

Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең бағытта айналатын құрамалы желқозғалтқышының тәжірибелік үлгісін сынау және жылуфизикалық параметрін анықтау үшін Amtast AW006 метеостанцияның деректері қолданылды (6.14-сурет). Бұл метеостанцияның айрықша сипаттамасы-WiFi арқылы желдің бағыты, жылдамдығы және күші сияқты сымсыз деректерді беру. Жауын-шашын туралы ескерту SMS түрінде болады, сонымен қатар деректерді басқару және талдау үшін iPhone немесе Android қолданбасын пайдалануға болады.

а) ә)

а) метеостанцияның сыртқы датчигінің сынақ полигонына орналастыру және ә) сыртқы датчиктің бейнесі мен экрандық дисплейде метеостанция мәліметтерінің көрсетілуі

Сурет 6.14 – Amtast AW006 метеостанциясы

Сымсыз метеостанцияның арқасында келесі параметрлерді алуға болады:

- ауа температурасының мәні;
- ауа ылғалдылығының диаграммасын;
- атмосфералық қысым;
- жауын шашын мөлшері;
- шық түсу температурасы;
- желдің жылдамдығы мен бағыты.

Қарағандының климаты шұғыл континентальды, яғни қысы қатал, жазы ыстық, ал жыл бойы жауын-шашын мөлшері өте аз. Жазда температура әрдайым +25...+27 °С және одан да жоғары болады, сондықтан өсімдіктер жиі күйіп кетеді.

Қыстың орташа температурасы -15..-17 °С. жылдың осы уақытында жолдар жиі борандармен байқалады. Көктемде еріген қар су тасқынына әкелуі мүмкін. Қарағанды жеріне жылына орта есеппен 332 мм жауын-шашын түседі.

Жылы маусым 4 айға созылады, 14 мамырдан 14 қыркүйекке дейін, максималды орташа тәуліктік температура 18 °С-тан жоғары. Қарағандыда жылдың ең ыстық айы шілде айы, орташа температурасы максимум 25 °С, минимум 13 °С.

Суық мезгіл 3,8 айға созылады, 20 қарашадан 14 наурызға дейін, ең төменгі орташа тәуліктік температура -3 °С-тан төмен. Қарағандыда жылдың ең суық айы қаңтар, орташа температурасы максимум -19 °С, минимум -10 °С.

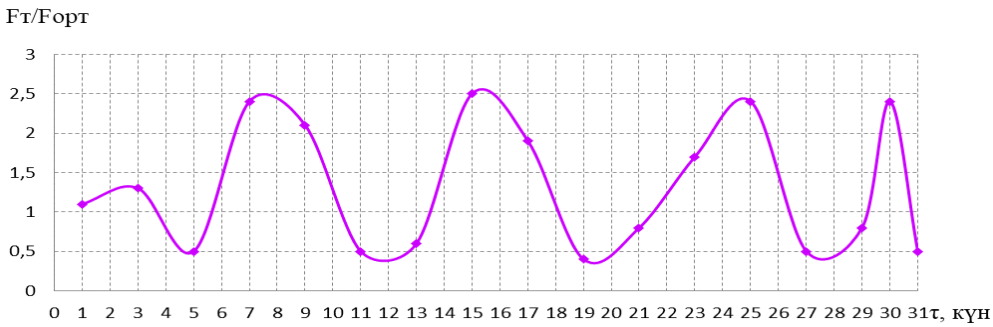
Жылдың төрт мезгіліне (қаңтар, сәуір, маусым, қазан) көлденең бағытта айналатын құрамалы жел қондырығының тәжірибелік эксперименттік сынақтары өткізілді (6.15 а, ә, б, в - сурет). Зерттеулер 2023 жылдың қазан айында және 2024 жылдың қаңтар, сәуір, маусым айларында жүргізілді.

а) ә) б) в)

а) күз мезгілі; ә) қыс мезгілі; б) көктем мезгілі; в) жаз мезгілі

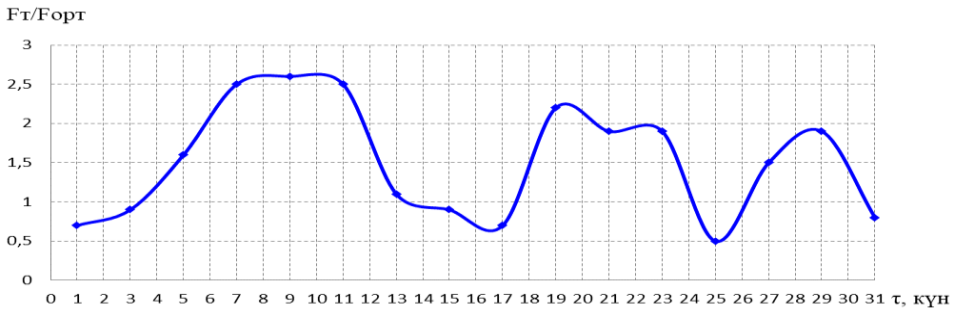
Сурет 6.15 – Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең осьті бағытта айналатын құрамалы жел энергетикалық қондырғыны сынау

Сынақтар нәтижесінде тарту күші мәндерінің әр айдың күндеріне тәуелділігі алынды. 6.16-6.19 суреттерде тарту күшінің өлшемсіз мәнінің қазандағы күндерге тәуелділігі көрсетілген.



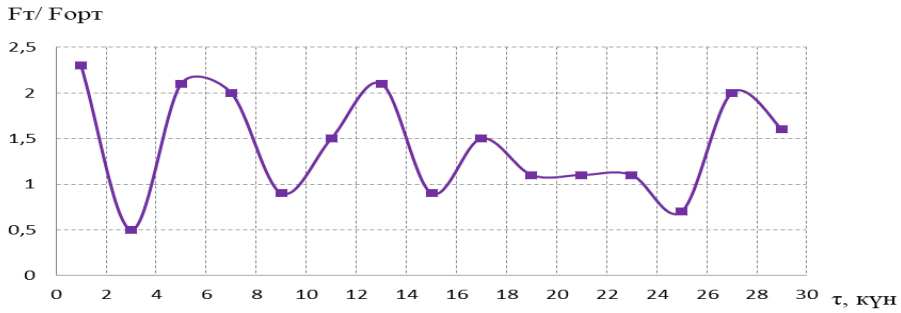
Сурет 6.16 – Тарту күшінің өлшемсіз мәнінің қазан айындағы күндерге тәуелділігі, 2023 ж.

6.16-суретте тартылыс күшінің максималды мәні 15 қазанда ауа температурасы 3^0С, желдің орташа жылдамдығы – 10 м/с болған кезде алынды.



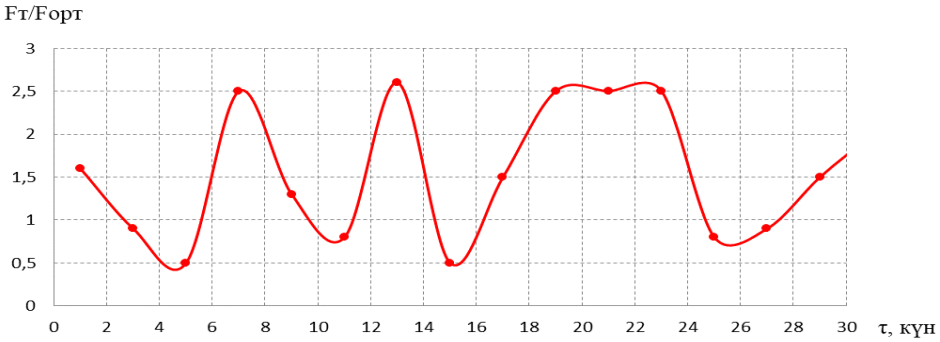
Сурет 6.17 – Тарту күшінің өлшемсіз мәнінің қаңтар айындағы күндерге тәуелділігі, 2024 ж.

6.17-суретте тарту күшінің максималды мәні 9 қаңтарда ауа температурасы -7^0С, желдің орташа жылдамдығы – 10 м/с болған кезде алынды.



Сурет 6.18 – Тарту күшінің өлшемсіз мәнінің сәуір айындағы күндерге тәуелділігі, 2024 ж.

6.18-суретте тарту күшінің өлшемсіз мәнінің сәуір айындағы күндерге тәуелділігі көрсетілген. Тарту күшінің максималды мәні 13 сәуірде ауа температурасы +8^0С, желдің орташа жылдамдығы – 9 м/с болғанда байқалды.



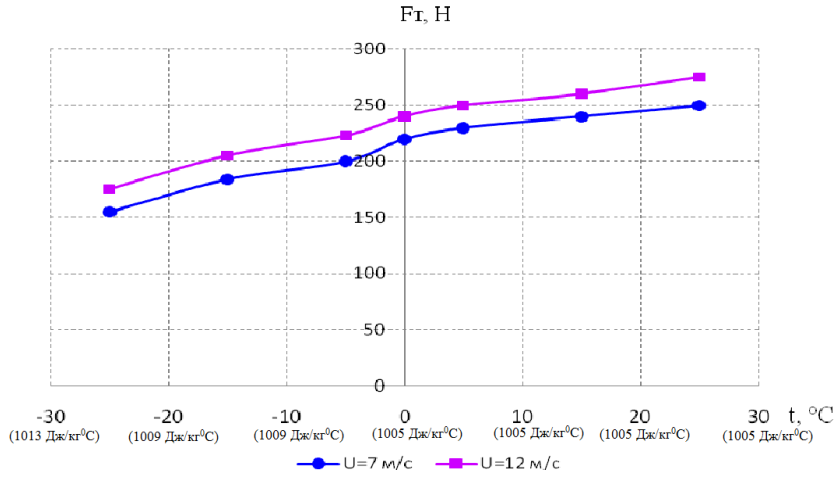
Сурет 6.19 – Тарту күшінің өлшемсіз мәнінің маусым айындағы күндерге тәуелділігі, 2024 ж.

6.19-суретте маусым айындағы күндерге тәуелділігі көрсетілген. Тарту күшінің максималды мәні ауа температурасы +27^{0}С және +32^{0}С, желдің орташа жылдамдығы – 11 м/с 20 маусымда және 12 м/с 29 маусымда тіркелді.

Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең айналу осі бар құрамалы жел энергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісін сынау және жылу-физикалық параметрлердің әсерін анықтау бойынша жұмыстар жүргізілді.

Зерттеу барысында желдің жылдамдығының 7 м/с және 12 м/с кезіндегі жел энергетикалық қондырғының тарту күшінің ауаның жылуфизикалық параметрлерінен тәуелділік графиктері алынды (6.20-6.24 суреттер).

6.20-суретте желдің орташа жылдамдығы 7 м/с және 12 м/с болған кезде жел энергетикалық қондырғының жұмысына эксперименттік зерттеулер жүргізілген. Тарту күшінің қоршаған орта температурасына тәуелділік графигі көрсетілген.



Сурет 6.20 – Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с және 12 м/с болғанда тарту күшінің температураға (жылусыйымдылыққа) тәуелділігі

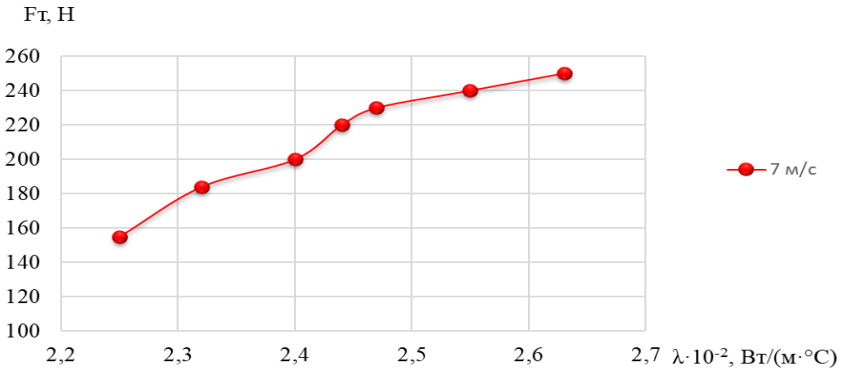
Осылайша, жел қондырғысының жұмысының графикалық деректері аэродинамикалық сипаттамаларға көрсеткендей, ең алдымен ауа ағынының жылдамдығының өзгеруі, содан кейін ауа температурасы әсер етеді, өйткені температураның минус градусында жел қондырғысының мойынтіректерінің майлағыштары қалыңдайды және бөлшектер арасындағы үйкелістің артуына байланысты жел доңғалағының баяу айналуы жүреді [120].

Температураның оң градустарында желқондырғысының айналатын бөлшектері мойынтіректерінің майлау материалдарының тұтқырлығы азаяды. Артынша, жел энергетикалық қондырғының бөлшектері арасында үйкеліс азаяды.

Тәуелділіктен қисықтардың көрінісін жел жылдамдығы, жел доңғалағының бөліктері арасындағы үйкеліс және ауа тығыздығы сияқты негізгі параметрлердің көлденең бағытта айналатын құрамалы жел энергетикалық қондырғының жұмысына әсер етумен байланыстыруға болады.

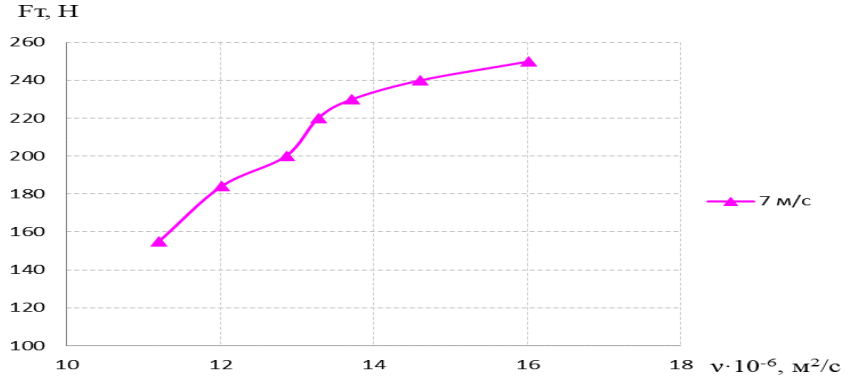
Температураның жоғарылауымен ауа молекулалары диссоциацияланады және оның жылу өткізгіштігінің максималды мәніне 0,001 атм қысым (разряд) кезінде қол жеткізіледі және температура 5000 К.

Ауаның жылусыйымдылығының мәні температураға кері пропорционал. Егер ауа бір типті молекулалардан тұрса, онда оның жылу сыйымдылығы температураның жоғарылауымен жоғарылайды (кванттық механика көрсеткендей). Бірақ іс жүзінде ауа - бұл әртүрлі газдардың қоспасы, онда температура өзгерген сайын микро қоспалардың мөлшері өзгереді (көмірқышқыл газы, метан, азот оксидтері, сутегі, су буы және т .б.). Атап айтқанда, суық ауада CO_2 қоспасы көбірек болуы мүмкін (қыздырылғанмен салыстырғанда). Сондықтан ауа қоспасының жылу сыйымдылығы температураның төмендеуімен өте әлсіз артуы мүмкін.



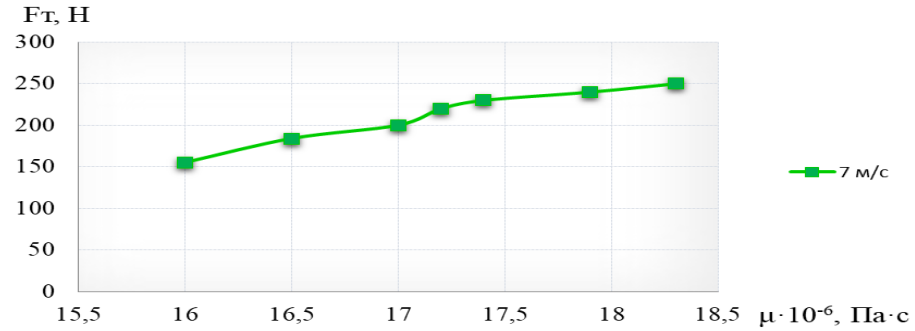
Сурет 6.21 – Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с болғанда тарту күшінің ауаның жылуөткізгіштік коэффициентіне тәуелділік графигі

6.21-суреттен ауа ағынының жылуөткізгіштік коэффициентінің артуымен жел энергетикалық қондырғының тарту күшінің мәні U=7 м/с кезінде жоғарылайтыны байқалады. Себебі, газ күйіндегі ауа өткізгіштігінің мөлшері қысым мен температураның жоғарылауымен артады.



Сурет 6.22 – Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с болғанда тарту күшінің ауаның кинематикалық тұтқырлығына тәуелділік графигі

6.22-суретте ауаның кинематикалық тұтқырлығы жоғарылаған сайын жел энергетикалық қондырғысының тарту күші артатыны көрсетілген. Ауа температурасының жоғарылауымен ауа тығыздығы төмендейді, алайда тұтқырлық (динамикалық және кинематикалық) молекулалық кинетикалық теорияға сәйкес қыздырылған кезде ауа молекулаларының қарқынды тербелісіне байланысты артады. Сондай-ақ, ауа температурасының жоғарылауы ауаның меншікті жылу сыйымдылығының мәніне шамалы әсер ететіні анықталды, температура -30°С +20°С-тан көтерілгенде, C_P мәні 0,8% - ға өсті. Ауаның жылу өткізгіштігінің мәні температураның өсуіне және ауаның жылу сыйымдылығына тікелей байланысты.



Сурет 6.23 – Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с болғанда
тарту күшінің ауаның динамикалық тұтқырлығына тәуелділік графигі

6.23-суретте ауаның динамикалық тұтқырлығының өсуімен жел энергетикалық қондырғының тарту күші де артқанын байқаймыз. Бұның себебі, температураға тура пропорционалдығымен сипатталады. Ауа қысымының 1 бардан 50 барға дейін артуынан μ динамикалық тұтқырлықтың мәні шамамен 5% ғана артады.

6.5 Бөлім бойынша қорытынды

- Сынақ палигонына арналған құрамалы көп қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының тәжірибелік үлгісі әзірленді.
- Жел доңғалағының D=1,8 м диаметрлі тәжірибелік үлгісінің тарту күшінің жел ағынының жылдамдығынан тәуеділігі зерттелді.
- Тәуелділіктен цилиндрдің айналу саны 600 айн/мин кезінде ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болғанда тарту күшінің мәні 274 Н максималды артқанын байқаймыз, ал айналым саны 900 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәні 300 Н-ға тең және айналым саны 1200 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәнің максималды 335 Н артқанын көреміз. Яғни айналым саны артқан сайын, тарту күшінің артатыны байқалады.
- Желдің жылдамдығының өзгеруімен жел энергетикалық қондырғының тарту күшінің ауаның жылуфизикалық параметрлерінен тәуелділіктері алынды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста көлденең бағытта айналатын құрамалы жел энергетикалық қондырғының аэродинамикалық сипаттамалары және оған ауаның жылу физикалық қасиеттерінің әсері зерттелді.

Диссертациялық жұмысты орындау барысында келесідей тұжырым жасалады:

1. Көлденең және тік айналу осі бар әртүрлі геометриялары құрамалы қалақшалардың аэродинамикасына ғылыми шолу жасалды.

2. Бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып, қозғалмайтын қалақшалы, айналмалы цилиндрлі құрамалы қалақшаның және көп қалақшалы жел энергетикалық қондырғының аэродинамикасын сандық зерттелді, қысымның таралу өрістері мен жылдамдық векторлары алынды. Сандық зерттеу мақсатында үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының айналасында Designmodeler КОМПАС 3D бағдарламасын қолдана отырып геометриялық модель жасалды. Цилиндрге қатысты қозғалмайтын қалақшаның оңтайлы бұрышын анықтау үшін сандық модельдеу ANSYS WORKBENCH бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асырылды.

3. Зертханалық үлгіде құрамалы қалақшалы жел энергетикалық қондырғысының макеті жобаланды және әзірленді. Ауа ағынының аз жел жылдамдығында құрамалы жел энергетикалық қондырғының жұмысы үшін айналмалы цилиндрлік элементтерінің аэродинамикалық сипаттамалары зерттеліп, келесі мәндер алынды:

- Желдің жылдамдығы 15 м/с кезде қалған 0º, 15º, 45º және 60º үлгілермен салыстырғанда, 30º құрамалы қалақша 6,25 Н минималды маңдайлық кедергі күші мен және 3,55 Н максималды көтеру күшін береді.

- Қозғалмайтын қалақша цилиндрге қатысты 30 градусқа орналастырылған кезде Рейнольдс саны $1 \cdot 10^4$ болғанда көтеру мен маңдайлық кедергі күштерінің коэффициенттерінің оңтайлы мәндері алынады: 0,41 және 0,2, ал $5 \cdot 10^4$ болғанда көтеру мен маңдайлық кедергі күштерінің коэффициенттерінің тұрақты мәндері анықталды: 0,14 және 0,26.

- 3 м/с-тан 12 м/с-қа дейін ұлғайған сайын жел доңғалағының тарту күшінің жоғарылауы анықталды. Алынған тәуелділік графикте ауа ағынының максималды жылдамдығы 12 м/с болғанда, тарту күшінің мәні 0 градуста 1,21 Н, 15 градуста 1,9 Н, 30 градуста 2,7 Н, 45 градуста 1,09 Н, 60 градуста 1,81 Н, содан кейін тарту күші тұрақтанады, яғни өсу байқалмайды. Бұл жағдайда жел доңғалағының айналу жиілігінің максималды мәні 350 айн/мин құрады.

- Жел энергетикалық қондырғысының аэродинамикалық күштерінің мәндері анықталды: тарту күші 2,9 Н және маңдайлық кедергі күші 7,04 Н. Сәйкесінше тарту күшінің коэффициенті 0,16-ға тең, ал маңдайлық кедергі күшінің коэффициенті 0,4- ке тең болды.

4. Сандық және эксперименттік мәліметтер негізінде қалақшаның аэродинамикалық сипаттамаларына салыстырмалы талдау жасалды. Үш қалақшалы жел энергетикалық қондырғысы үшін маңдайлық кедергі күшінің салыстырмалы графигі бойынша U=3 м/с кезде минималды мәндер Fм.к.эксп =

2 Н, ал Fм.к.санд = 2,6 Н. Максималды жылдамдықта U=12 м/с кезде Fм.к.эксп = 7,04 Н, ал Fм.к.санд = 7,17 Н. Тарту күші ағын жылдамдығының жоғарылауымен монотонды түрде өсетіні айқындалды. U= 12 м/с кезінде F максималды мәндері алынады: Fт.эксп = 2,86 Нжәне Fт.санд = 3,5 Н. Рейнольдс сандары 10000÷40000 болған кезде ЖЭҚ макетінің маңдайлық кедергі күші коэффициентінің мәні салыстырмалы түрде төмендейді. ЖЭҚ макетінің маңдайлық кедергі күші коэффициентінің сандық және эксперименттік деректерін салыстыру деректердің рұқсат етілген қателік шегінде екенін көрсетеді. Сандық және эксперименттік зерттеу нәтижелері негізінде алынған мәліметтер арасындағы ең үлкен алшақтық кезінде қателік 3-4% - дан аспайды.

5. Құрамалы қалақшалары бар ЖЭҚ тәжірибелік үлгісі әзірленді және құрастырылды. Тәжірибелік жел энергетикалық қондырғының цилиндрінің айналу саны 600 айн/мин кезінде ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болғанда тарту күшінің мәні 274 Н максималды артқанын байқаймыз, ал айналым саны 900 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәні 300 Н-ға тең және айналым саны 1200 айн/мин болғанда ауа ағынының жылдамдығы 15 м/с болған тарту күшінің мәнің максималды 335 Н артқаны анықталды. Әртүрлі климаттық жағдайларда көлденең бағытта айналатын құрамалы жел энергетикалық қондырғының тәжірибелік үлгісінің жылуфизикалық параметрлері анықталды. Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с және 12 м/с болғанда ауа ағынының температурасының, жылусыйымдылығының, жылуөткізгіштік коэффициентінің, динамикалық және кинематикалық тұтқырлығының артуымен жел энергетикалық қондырғының тарту күшінің өзгерісі (жоғарылауы мен төмендеуі) анықталды.

6. Жел энергетикалық қондырғысының құрамалы қалақшаларының аэродинамикасына ауа ағынының жылу физикалық параметрлерінің әсері зерттелді. Желдің орташа жылдамдығы 7 м/с және 12 м/с кезінде орташа температура +25°С, Ср=1005Дж/кг°С, λ=2.63 Вт/м°С, $\nu=16.02\cdot10^{-6}$ м^2/с, $\mu=18.3\cdot10^{-6}$ Па·с болғанда тарту күшінің мәндері Fт=250-275 Н болды. Ал орташа температура -25°С кезде $C_р$=1009Дж/кг°С, λ=2.25 Вт/м°С, $\nu=11.21\cdot10^{-6}$ м^2/с, $\mu=16\cdot10^{-6}$ Па·с болғанда тарту күшінің мәндері Fт=155 Н болды.

Желдің жылдамдығы жоғарылаған сайын пайда болатын кернеу мен ток өседі. Жел жылдамдығының жоғарылауымен өндірілетін қуат сызықтық түрде өседі, ал 15 м/с жылдамдықта жел энергетикалық қондырғысы 650 Вт номиналды қуат береді.

Алынған нәтижелер қолданбалы сипатқа ие және оларды табиғи сынақтар үшін көлденең бағытта айналатын құрамалы айналмалы цилиндрлі көпқалақшалы жел турбинасын жасау кезінде қолдануға болады. Жел энергетикалық қондырығының қалақшаларының, яғни цилиндрлердің тиімді арақашықтықта орналастырылуы жел ағының аз энергиясын пайдаланып, көп электр энергиясын өндіру мүмкіндігін де арттырады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Cochran J., Kazakhstan’s Potential for Wind and Concentrated Solar Power//Kazakhstan Institute of Management Economics and Strategic Research. - Kazakhstan, Almaty. -2008.- P. 3-5.

2 Babazhanova, Z., Khambar, B., Yessenbekova, A., Sartanova, N., & Jandossova, F. New Energy System in the Republic of Kazakhstan: Exploring the Possibility of Creating and Mechanisms of Implementing. International Journal of Energy Economics and Policy. – 2017.-№ 7.-p. 164–170.

3 Тен Н. Ю., Поветкин В.В. Ветроэнергетика в казахстане: возможности и проблемы, препятствующие ее развитию. Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2022. 4(97). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/-item/13512.

4 Дробышев, А.; Балтаханова, А. Перспективы и проблемы развития ветроэнергетики в Казахстане//Казахская академия транспорта и коммуникаций им.М. Тынышпаева – 2017. - Алматы, Казахстан. –№3.- с. 176-171.

5 Буктуков Н.С. Перспективы развития ветроэнергетики Казахстана // Материалы Казахстанско–Российской научно–практической конференции «Проблемы ресурсоэнергообеспечения и использования альтернативных экологически чистых способов получения энергии». – Усть–Каменогорск, 2008. – С. 29–40.

6 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К. Основы теории ветротурбины Дарье. – Алматы, 2001. – 104 с.

7 Ершина А.К., Ершин Ш.А. Об аэродинамике ветротурбин Дарье с прямыми лопастями // Известия МН–АН РК. Серия «Физико–математическая». – 1998. – №1(200). – С. 86–91.

8 Ершина А.К., Тулепбергенов А.К. Расчет характеристик вертикально–осевой ветротурбины «Дарье» // Вестник КазГУ. Серия «Математика, механика, информатика». – 2001. – №2. – С. 66–71.

9 Ершина А.К. Аэродинамика вертикально–осевой ветротурбины VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – Пермь, 2001. – С. 10–12.

10. А.с. 19114. Ветродвигатель Бидарье / Ш.А. Ершин, Ч.Ш. Ершин, А.К. Ершина; опубл. 15.02.2008, Бюл. № 3. – 3 с.

11. Байшагиров Х.Ж., Каримбаев Т.Д., и др., Разработка и создание композиционной ветроэлектрогенераторной установки с диффузором: отчет о НИР. – Алматы. – 2004. – 91 с.

12. А.с. 802. Ветровая энергетическая установка / Х.Ж. Байшагиров; опубл. 16.04.2012, Бюл. № 4. – 4 с.

13. История успеха: «Зеленые» генераторы Tree Energy. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://dzen.ru/a/WuHtt7zxvJfVj0eE.

14. Турбины магнуса. [Электронный ресурс]. – Электрон.дан. – Режим доступа: https://www.energovector.com/energoznanie-turbiny-magnusa.html.

15. Ветроэнергетический потенциал Беларуси по оценке экспертов БО МАЭ. International Network for Sustainable Energy. [Электронуный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.inforse.org/europe/pdfs/NGO-Energy4.pdf.

16. Спиральный ветрогенератор Helix Wind. [Электронный ресурс]. – Электрон.дан.–Режимдоступа:http://vetrogenerator.com.ua/vetrogenerator/vertikal-/480-spiralnyy-vetrogenerator-helix-wind.html.

17. Wei-Hsin Chen, Jhih-Syun Wang, Min-Hsing Chang, Anh Tuan Hoang, Su Shiung Lam, Eilhann E. Kwon, Veeramuthu Ashokkuma. Optimization of a vertical axis wind turbine with a deflector under unsteady wind conditions via Taguchi and neural network applications. *Energy Conversion and Management*. Volume 254, 15 February 2022. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115209].

18. Исатаев С.И., Акылбаев Ж.С., Турмухамбетов А.Ж. Аэрогидродинамика и теплообмен криволинейных тел. – Алматы: Ғылым, 1996, 473 с.

19. Исатаев С.И., Жангунов О. Поперечное обтекание короткого цилиндра со сферическими торцами потоком воздуха. Исследование процесса переноса. – Алматы, 1985. – С. 17–21.

20. Гольдштейн С. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. Госиздат. М., 1948

21. Чжен П. Отрывные течения. Изд. «Мир», М., 1973, с.280.

22. Исатаев С.И., Жангунов О. Влияние относительной длины коротких цилиндров со сферическими торцами на интенсивность теплообмена: тез. конф. молодых ученых. – Алма–Ата, 1985. – С. 221–222.

23. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. Особенности аэродинамики вращающегося цилиндра в потоке // Промышленная теплотехника. – Киев, 2003. – Т.25, №4. – С. 279–281.

24. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А., Миньков Л.Л. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа. Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. – Алматы: Изд. КазНУ, 2003. – С. 78–82.

25. Ламб Г. Гидродинамика (пер. с англ). – М., 1947.

26. Bairstow. Cave and Hang // Phil. Trans. A., 1923. V. 223. P. 383-432.

27. White S.M. Proc. roy.Soc. 1945. A 186. P. 472.

28. Talmor E. Turbulence determination and blockade correction for immersed cylinder heat transfer at high Reynolds numbers // AICheJ. 1966. V. 12. №6.

29. Blasius H. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung // Z. Math. u. Phys. 1908. № 56. S. 1-37.

30. Hiemenz K. Die Grenzschicht an einem in den gleichförmigen Flüssigkeits-strom eingetauchten geraden Kreiszylinder // Dinglers Politechnisches Journal. – Gottengen, 1911. S. 321.

31. Howarth L. On the Calculation of the Steady Flow in the Boundary Layer Near the Surface of a Cylinder in a Stream // ARC Report. 1935, 1632.

32. Pohlhausen K. Zur naherungsweisen Integration der Differential gleichung der laminaren Reibungsschicht // ZAMM. 1921. B. 1. S. 252-268.

33. Thom A. The Laminar Boundary Layer of the Front Part of a Cylinder // ARC Report. 1928, 1176.

34. Fage A. The Airflow –Around a Circular Cylinder in the Region, Where the Boundary Separates from the Surface // Phil Mag. 1929. V. 7. P.253.

35. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. 712 с.

36. Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. / Пер. с англ. – М: ИЛ, 1959. 399 с.

37. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. – М.: Наука, 1965. 431 с.

38. Вулис Л.А. О турбулентном следе за телом // Исследование процессов переноса. Вопросы теории относительности. – Алма- Ата: Учпедгиз, 1960.

39. Вулис Л.А., Исатаев С.А. Турбулентное движение несжимаемой жидкости в следе за плохообтекаемым телом // Исследование физических основ рабочего процесса топок и печей. – Алма-Ата: Изд. АН КазССР, 1957.

40. Исатаев С.И. О турбулентном следе за плохообтекаемым телом // Тр. совещ. По прикладной газовой динамике. – Алма-Ата: Изд. АН КазССР, 1959.

41. Акылбаев Ж.С. Турбулентный след за телом // Математика и физические исследования. – Караганда: Изд. КарГУ, 1974. С. 19-25.

42. Иванова А.Л., Смирнова В.С., Карпова А.С., Фоминых С.О. Эффект Магнуса. Актуальные вопросы методики преподавания математики и физики. Сборник докладов и научных статей региональной научно-практической конференции. Чебоксары, 2021. С. 92-98.

43. Удюрова Л.В. Эффект Магнуса и его применение в технике. Студенческая наука - первый шаг к цифровизации сельского хозяйства. Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, в 3 ч. Том Ч. 2. Чебоксары, 2021. С. 112-113.

44. Бычков Н.М. Ветродвигатель с эффектом магнуса. 1. результаты модельных испытаний. Теплофизика и аэромеханика. Том: 11, № 4, 2004. С. 583-596.

45. Maro Jinbo, Felix Alberto Farret, Ghendy Cardoso Junior, Daniel Senter, Marcelo Franklin Lorensetti. MPPT of Magnus Wind System with DC Servo Drive for the Cylinders and Boost Converter. Journal of Wind Energy. Volume 2015. https://doi.org/10.1155/2015/148680.

46. Newbuild bulk carrier to be equipped with 5 Norsepower tiltable rotor sails. Green Car Congress. 2020. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.greencarcongress.com/2020/12/20201222-norsepower.html

47. Янсон Р.А. Ветроустановки. Учебное пособие. Под ред. М.И. Осштова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 36 с.

48. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.

49. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: нац. аэрокосм. ин-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. тех. ун-т, 2004. – 519с.

50. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: нац. аэрокосм. ин-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. тех. ун-т, 2003. – 400с.

51. Sorensen Bent. History of, and resent progress in wind energy utilization/ Annu. Rev. Energy Environ. – 1995. P. 387 – 424.

52. Гордиевский Е.М., Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Соломин Е.В., Станчаускас В.И. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки в программе matlab/simulink. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. технические науки. 2020. № 1. С. 25-32.

53. Гордиевский Е.М., Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Соломин Е.В. Разработка имитационной модели мобильного энергокомплекса на базе ВИЭ в программе MATLAB // Вестн. ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 31. С. 51 – 71.

54. Куклин В.Д. Сравнительный анализ данных, полученных в результате моделирования ВЭУ с применением СМЗ // Молодежь и системная модернизация страны. 2019. С. 57 – 59.

55. Алексеевский Д.Г., Прокопеня О.Н., Панкова О.О., Манаев К.В. Математическая модель экспериментальной ветроэнергетической установки // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Машиностроение. 2017. № 4 (106). С. 40 – 43.

56. Jureczko M., Pawlak M., Mężyk A. Optimization of wind turbine blades // Journal of Materials Processing Technology. –2005. – Volume 167. – Issues 2–3. –P. 463-471.

57. Мирошник В.Ю., Подберезкин Д.А., Копейкин Д.А., Соколов П.С., Артамонова Е.Ю. Методы аэродинамического проектирования ВЭУ // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12 (54) . – Часть 3. – С.142-153.

58. Корнилов В. И., Лысенко В. И. Исследование аэродинамических характеристик цилиндрических тел в сверхзвуковом потоке газа // Вестник НГУ. Серия Физика. – 2011. – Том 6. – Выпуск 4. – С.16-24.

59. Танашева Н.К., Шуюшбаева Н.Н., Мусенова Э.К. Исследование зависимости аэродинамических характеристик вращающихся цилиндров от угла скоса воздушного потока // Журнал технической физики. – 2018. – 44.

60. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. Особенности аэродинамики вращающегося цилиндра в потоке // Промышленная теплотехника. – Киев, 2003. – Т.25, №4. – С. 279–281.

61. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А., Миньков Л.Л. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа. Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. – Алматы: Изд. КазНУ, 2003. – С. 78–82.

62. Олейников А.М., Матвеев Ю.В., Канов Л.Н. Моделирование режима ветроэлектрической установки малой мощности // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 16–20.

63. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. – С–Пб.: Балтийский гос. ун–т, 2001. – 34 с.

64. Батурин О.В. Построение расчетных моделей в препроцессоре Гамбит универсального программного комплекса Флуент: учебное пособие. – Самара: Изд– во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2009. – 172 с.

65. Бруаяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2010. – 271с.

66. Liu, P., and P. Liu. 2021. Aerodynamics Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-33-6660-2_2.

67. Tanasheva, N. K. 2021. Numerical simulation of the flow around a wind wheel with rotating cylindrical blades. Eurasian Physical Technical Journal 18 (1):51. doi:10.31489/2021No1/51-56.

68. Tleubergenova A. Zh., Tanasheva N.K., Shaimerdenova K.M., Kassymov S.S. Bakhtybekova A.R., Shuyushbayeva N.N., Uzbergenova S.Zh., Ranova G.A. Mathematical modeling of the aerodynamic coefcients of a sail blade. Advances in Aerodynamics. Volume 5(1), №14. December 2023. DOI:10.1186/s42774-023-00140-6.

69. Tanasheva N.K., A.R. Bakhtybekova G.S., Shaimerdenova S.E., Sakipova N. Shuyushbaeva. Modeling aerodynamic characteristics of a wind energy installation with rotating cylinder blades on the basis of the ansys suite. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 95 (2):457. 2022. doi:10.1007/s10891-022-02500-3.

70. Dyusembaeva A.N., Tleubergenova A. Zh., Tanasheva N.K., Nussupbekov B.R., Bakhtybekova A.R., Kyzdarbekova Sh. S. Numerical investigation of the flow around a rotating cylinder with a plate under the subcritical regime of the Reynolds number. International Journal of Green Energy. Volume 21 (5), Pages 973 – 987. 2024. DOI: 10.1080/15435075.2023.2228394.

71. Kussayinov K., Tanasheva N.K., Shuyushbayeva N.N., Ryzhykh Yu.N., Stepanova Yu.O., Bagdatova S.B. Simulation of airflow pattern of two rotating cylinders. Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2016. – №2 (82). – С. 50–55.

72. Pezzotti S., Mora V. N., Andrés A. S., Franchini S. Experimental study of the Magnus effect in cylindrical bodies with 4, 6, 8 and 10 sides. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020. 197:104065. doi: 10.1016/j.jweia.2019.104065.

73. Dyusembaeva A.N., Tanasheva N.K, Tleubergenova A. Zh., Bakhtybekova A.R., Kutumova Zh.B., Tussuphanova A.R., Abdirova N.T. Optimal choice of the geometric shape rotor blade wind turbine using the numerical method. Bulletin of the Karaganda University. – Physics series. – 2024. – № 2(114). – P.53-64. https://doi.org/10.31489/2024ph2/53-64

74. Benim, A. C., E. Pasqualotto, and S. H. Suh. Modelling turbulent flow past a circular cylinder by RANS, URANS, LES and DES. An International Journal 8 (5). Pp.299-307. 2008. doi:10.1504/PCFD.2008.019483.

75. Bruno, L., D. Fransos, N. Coste, and A. Bosco. 3D flow around a rectangular cylinder: A computational study. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98 (6–7). Pp.263-276. 2010. doi:10.1016/j. jweia.2009.10.005

76. Гарбузов В.М., Ермаков А.Л., Кубланов М.С., Ципенко В.Г. Аэромеханика: учебник для студентов вузов. – М.: Транспорт, 2000. – 45 с.

77. Мартынов А.К. Прикладная аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1972. – 120 с.

78. Хозяинов Б.П., Березин М.А. Методика проведения испытаний моделей ветроэнергетической установки в аэродинамической трубе 3–АТ–17.5/3 фирмы УНИКОН // Вестник КузГТУ. – 2000. – № 4. – С. 38−42.

79. Верховский В.П. Газодинамическое проектирование профилирован–ных сопел аэродинамических труб: дис. док. тех. наук: 01.02.05 / Центр. аэродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. – М., 2005. – 250 с. – Инв. № 004410413.

80. Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Дюсембаева А.Н., Тансыкбаева Н.К. Экспериментальное исследование аэродинамики системы вращающихся цилиндров в турбулентном потоке // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: матер. 8–й международной научной конференции, посвященной 40–летию КарГУ им. академика Е.А. Букетова. – Караганда, 2012. – С. 368–372.

81. Kussaiynov K., Sakipova S.E., Tansykbaeva N.K. Experimental research of aerodynamics of the system of the revolved cylinders in a turbulent stream // Turbulence, Heat and Mass Transfer: 7th International Symposium (September 24–27). – Palermo, 2012. – P. 125–128.

82. Гарипова Л.И., Батраков А.С., Кусюмов А.Н., Михайлов А. С., Баракос Дж. Определение аэродинамических характеристик модели несущего винта на режиме осевого обтекания // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2014. – № 3. С. 7–13.

83. Сертификат об утверждении типа средств измерений. Номер: KZ71VTN00004781. Дата выдачи: 04.11.2020.

84. Тахометры АТ-6, АТ-8. Руководство по эксплуатации v. 2011-07-06 MIT JNT DVB. 2011. 4с.

85. Шишмарёв В.Ю. Технические измерения и приборы. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб.и доп.- Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 377 с.

86. Инструкция по эксплуатации цифрового мультиметра. 2001. 16 с.

87. Мұхамедрахим А.Р. Дюсембаева А.Н. Көлденең осьті айналмалы цилиндрлі құрамалы жел қондырғысының аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу. Бөкетов оқулары-2023. Магистранттар мен студенттердің Аймақтық ғылыми-тәжірибелік конференциясының материалдары. 2023. 38-41 б.

88. Кусаиынов К., Дюсембаева А.Н., Тургунов М.М., Тансыкбаева Н.К. Аэродинамика системы вращающихся цилиндров // Актуальные проблемы

современной физики: матер. междунар. конф., посв. 80–летию профессора Исатаева С.И. – Алматы, 2012. – С. 18–22.

89. Sakipova S.E., Kussaiynova A., Dyusembaeva A., Tansykbaeva N. Aerodynamics of The Revolved Cylinders in A Cross Turbulent Stream // Eurasian Physical Technical Journal. – 2012. – Vol.9, №1(17). – P. 39–44.

90. Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Омаров Н. Анализ эффективности ветродвигателей с цилиндрическими элементами переменного сечения // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2010. – №1 (57). – С. 41–46.

91. Тансыкбаева Н.К., Тургунов М.М., Кусаиынова А. Экспериментальное исследование аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2011. – № 4 (64). – С. 49–52.

92. Ахмадиев Б.А., Тургунов М.М., Дюсембаева А.Н., Тансыкбаева Н.К. Влияние пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – Киев, 2013. – № 1(12). – С. 420–425.

93. Kusaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Kalikova A., Dysembaeva A. The effect of porosity on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder // Eurasian Physical Technical Journal. – 2013. – Vol.10, №.2 (20). – P. 26–32.

94. Танашева Н.К., Шрагер Э.Р., Сакипова С.Е., Дюсембаева А.Н., Нургалиева Ж.Г., Карсыбеков Р. Исследование аэродинамических характеристик ветрогенератора на основе эффекта Магнуса. Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2017. – № 3 (87). – С. 60–64.

95. A.Zh. Tleubergenova, A.N. Dyusembayeva, N.K. Tanasheva, Sh.S. Kyzdarbekova, A.R. Mukhamedrakhim. Analysis of aerodynamic characteristics of a two-bladed wind power plant containing combined power elements. Bulletin of the karaganda university Physics series. 2023. Volume 3. Issue 111. Page 143-150. Q 4. DOI10.31489/2023PH3/143-150

96. Шрагер Э.Р., Танашева Н., Тургунов М., Дюсембаева А. Экспериментальное исследование силы лобового сопротивления макета ветродвигателя в рабочем режиме // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2014. – № 3(75). – С. 47–52.

97. Кусаиынов К., Тансыкбаева Н.К., Кусаиынова А., Тургунов М.М., Дюсембаева А.Н. Исследования аэродинамики вращающихся двух цилиндров расположенных под углом друг другу // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: матер. 8–й междунар. научной конф., посв. 40–летию КарГУ им. академика Е.А. Букетова. – Караганда: Изд–во КарГУ, 2012. – С. 372–375.

98. Кусаиынов К., Танашева Н.К., Тургунов М., Дюсембаева А. Исследование лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя в рабочем режиме // Вестник Томского государственного университета. Серия «Математика и механика». – 2014. – № 4(30). – С. 82– 88.

99. Tleubergenova, A.Z., Dyusembaeva, A.N., Tanasheva, N.K., Minkov, L.L.,

Mukhamedrakhim, A.R. Investigation of aerodynamic thrust force of the wind power plant with combined blades. Eurasian Physical Technical Journal, 2023, 20(2 (44)), pp. 65–69.

100. Tleubergenova A.Zh., Dyusembayeva A.N., Tanasheva N.K., Kyzdarbekova Sh.S., Mukhamedrakhim A.R. Analysis of aerodynamic characteristics of a two-bladed wind power plant containing combined power elements. Bulletin of the Karaganda University. – Physics series. – 2023. – № 3(111). –P.143-150. https://doi.org/10.31489/2023ph3/143-150

101. Tanasheva N.K., Tleubergenova A.Zh., Shaimerdenova K.M., Minkov L.L., Uzbergenova S.Zh. Investigation of the aerodynamic forces of a triangular wind turbine blade for the low wind speeds. Eurasian physical technical journal. – 2021 Vol. 18, No. 4(38)–P.59–64. https://up.ksu.kz/phtj/2021_18_4_38/8.pdf

102. Tleubergenova A.Zh., Dyusembayeva A.N., Tanasheva N.K., Bakhtybekova A.R., Kutumova Zh.B., Mukhamedrakhim A.R. Experimental studies of the performance efficiency of a wind turbine with combined blades. Eurasian physical technical journal. – 2024 Vol. 21, No. 2(48)–P.31–37. https://doi.org/10.31489/2024No2/31-37

103. Tanasheva N.K., Tleubergenova A. Zh., Dyusembaeva A.N., Satybaldin A. Zh., Mussenova E. K., Bakhtybekova A. R., Shuyushbayeva N. N., Kyzdarbekova Sh.S., Suleimenova S., Tussypbayeva A.S. Determination of the aerodynamic characteristics of a wind power plant with a vertical axis of rotation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 8-122, Pages 36-43. 2023. DOI:10.15587/1729-4061.2023.277759.

104. Tleubergenova A.Zh., Tanasheva N.K., Shaimerdenova K.M., Minkov L.L., Dyusembaeva A.N., Uzbergenova S.Zh. Study of aerodynamic parameters of the sail blade. Bulletin of the Karaganda university. Physics series. № 1(105)/2022 – pp. 58-65. https://physics-vestnik.ksu.kz/apart/2022-105-1/6.pdf.

105. A.Zh. Tleubergenova, N.K. Tanasheva, K.M. Shaimerdenova, N.K. Botpaev, L.L. Minkov, S.B. Kassiyev Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Two-Bladed Sailing Wind Turbine. Bulletin of the Karaganda university. Physics series. № 1(109)/2023. Pp. 42-48. DOI 10.31489/2023PH1/42-48

106. Танашева Н.К., Дюсембаева А.Н., Тлеубергенова А.Ж., Садвакасова Т.А. Үш қалақшалы желгенераторының аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу. Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университетінің 60 жылдығына арналған "Шоқан оқулары-26: Аймақпен өзара әрекеттесу мәнмәтініндегі Қазақстан ғылымының даму векторлары" атты халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары, Том 2, Көкшетау, 2022.-Б. 62-67.

107. Тлеубергенова А.Ж. Исследование аэродинамических характеристик на прочность материала для парусной лопасти. Science and technology innovations: Сборник статей VI Международной научно-практической конференция (18октября 2021 г.)–Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. – С.13-19.

108. Н.К. Танашева, Н.Н. Шуюшбаева, А.Ж. Тлеубергенова, Д.Қ. Шаханов. Магнус эффектісіне негізделген жел қондырғысының жел энергиясын пайдалану коэффициенті мен тезжүрістілігін зерттеу. Ш.

Уәлиханов атындағы Көкшетау университетінің 60 жылдығына арналған "Шоқан оқулары-26: Аймақпен өзара әрекеттесу мәнмәтініндегі Қазақстан ғылымының даму векторлары" атты халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары, Том 2, Көкшетау,2022.-Б. 75-80.

109 Suleimenova S. Y., Tleubergenova A. Zh., Tussupbaeva A.S., Ranova G. A. Investigation of the lifting force coefficient of a model of a blade of a wind power plant. MODERN SCIENTIFIC RESEARCH: сборник статей Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2022. - С.7-8.

110. Shaimerdenova K.M., Tleubergenova A.Zh., Tanasheva N.K., Dyusembaeva A.N., Minkov L.L., Bakhtybekova A. R. Aerodynamic improvement of a two-blade magnus wind turbine: numerical and experimentalanalysis of aerodynamics and pressure distribution. Eurasian physical technical journal. – 2025 Vol. 22, No. 2(52)–P.79–87.

111. K. M. Shaimerdenova1, A. Zh. Tleubergenova, N. K. Tanasheva3, L. L. Minkov, N. T. Abdirova. Investigation of thermophysical factors affecting wind power plant blade efficiency. Вестник Торайгыров университета. Серия: Физика, математика и компьютерные науки. № 1 (2025). С.-219-229. https://doi.org/10.48081/ZAZE5942.

112. В.П. БАСС, Л.Л. ПЕЧЕРИЦА. Зависимость силы Магнуса от числа Кнудсена при поперечном стационарном обтекании вращающегося цилиндра. Техн. механика. – 2009. – № 3. С. 62-76.

113. Tleubergenova A.Zh., Tanasheva N.K., Shaimerdenova K.M., Kyzdarbekova Sh.S. Pilot tests of a wind power plant with sail bladesunder low wind conditions. Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование. Международная научно-техническая конференция. Международная научно-техническая конференция (Алматы, Казань, 20-21 октября 2022 г), Электронный сборник научных статей по материалам конференции. В трех томах Том 1, 2023. С.126-130.

114. Тлеубергенова А.Ж., Танашева Н.К., Шаймерденова К.М., Дюсембаева А.Н., Сатыбалдин А.Ж. Исследование влияния направления набегающего потока по отношению к плоскости трехцилиндрового ротора на аэродинамические коэффициенты. Письма в ЖТФ. –2023. –Том 49. – Вып. 7. – С.12-15.

115. Танашева Н. К., Тлеубергенова А.Ж., Дюсембаева А. Н. Жел энергетикасының негізгі принциптері мен мәселелері. Нұр-сұлтан: Изд-во «Алтын кітап», 2023.–130 б.

116. Патент пайдалы модельге № 9072 «Құрамалы қалақшалары бар көлденең осьтік жел электр қондырғысы» 14.02.2024 ж.

117. Тлеубергенова А.Ж. Исследование силы тяги ветроустановки с лопастями в виде паруса. «Глобальная наука и инновация 2021: Центральная азия» - Серия «Технические науки». (Октябрь 2021) – Нур-Султан: № 3 (14)/2021 -С.79-82.

118 Танашева Н.К., Ранова Г.А., Тлеубергенова А.Ж., Саденова К.К. Исследование коэффициента момента силы тяги двухлопастного

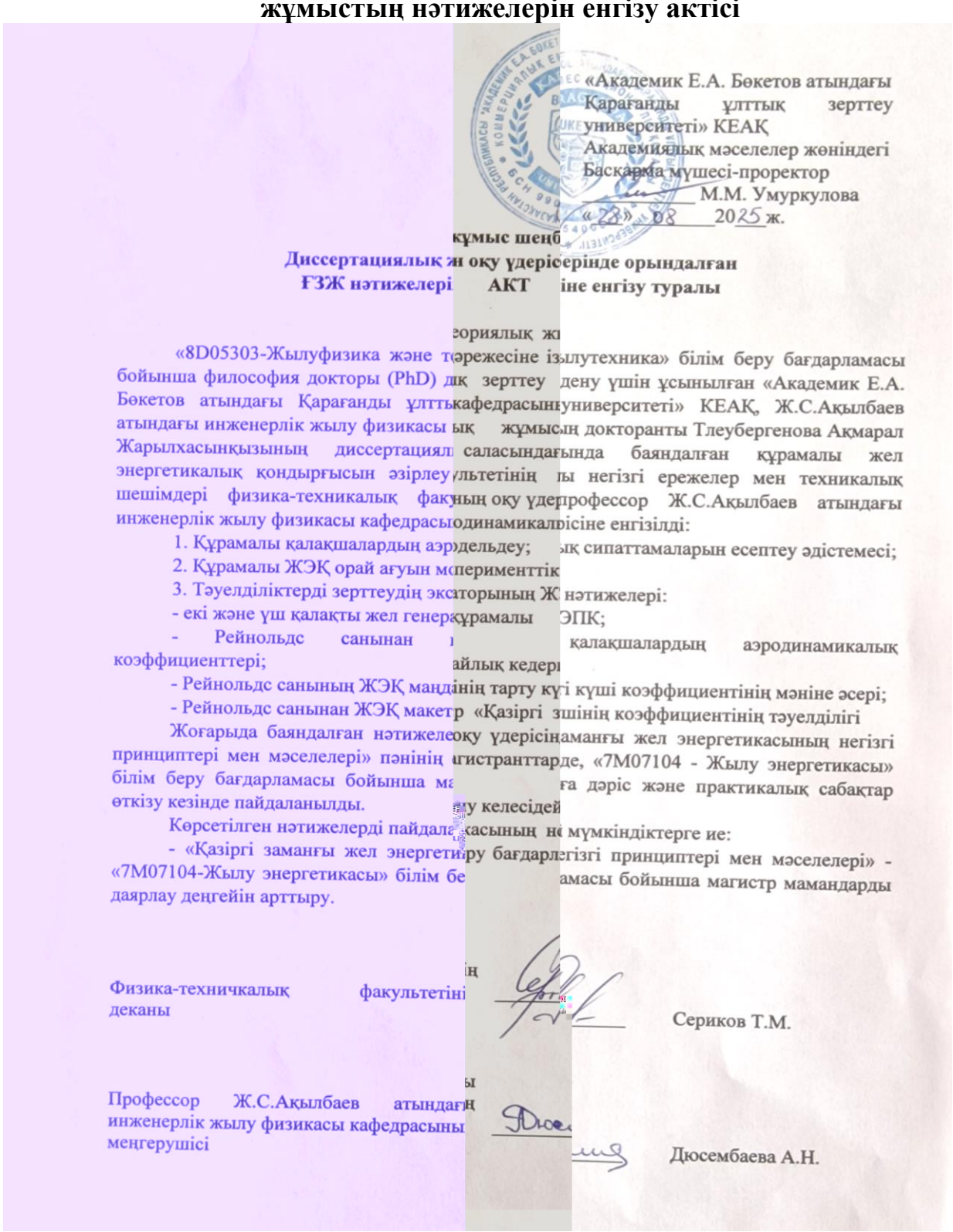
ветродвигателя. Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития: Сборник статей XV Международной научно-практической конференция (8 ноября 2021 г.) – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. – С.60-66.

119. Tanasheva N.K., Tleubergenova A.Zh., Shaimerdenova G.M, Sadvakasova T.A. Investigation of an electric generator for a wind turbine with variable stabilization. Ш.Уәлиханов атындағы көкшетау университетінің хабаршысы. Жаратылыстану ғылымдары сериясы. 2021, №3. Б. 22-30.

120. Танашева Н.К., Тлеубергенова А.Ж., Дюсембаева А.Н., Дуйсенова К. Р. Ұзындығы шектеулі цилиндрлік денелердің жылу алмасуын зерттеу. Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университетінің 60 жылдығына арналған "Шоқан оқулары-26: Аймақпен өзара әрекеттесу мәнмәтініндегі Қазақстан ғылымының даму векторлары" атты халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары. Көкшетау, 2022. - Том 1. Б. 479-485.

ҚОСЫМША А

Е. А. Бөкетов атындағы ҚарҰЗУ-нің оқу процесіне диссертациялық жұмыстың нәтижелерін енгізу актісі



«Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті» КЕАҚ
Академиялық мәселелер жөніндегі Басқарма мүшесі-проректор
_____ М.М. Умуркулова
«23» 08 2025 ж.

...ұмыс шең...

Диссертациялық ...н оқу үдерісе...ерінде орындалған
ҒЗЖ нәтижелері... АКТ ...іне енгізу туралы

...ориялық жұ...

«8D05303-Жылуфизика және т...әрежесіне із...лутехника» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) ...дық зерттеу ...дену үшін ұсынылған «Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлтты...кафедрасын...университеті» КЕАҚ, Ж.С.Ақылбаев атындағы инженерлік жылу физикасы ...ық жұмыс...ың докторанты Тлеубергенова Ақмарал Жарылхасынқызының диссертациял... саласындағында баяндалған құрамалы жел энергетикалық қондырғысын әзірлеу...ультетінің ...ы негізгі ережелер мен техникалық шешімдері физика-техникалық фа...ның оқу үдер...профессор Ж.С.Ақылбаев атындағы инженерлік жылу физикасы кафедрасы...одинамикал...дісіне енгізілді:

1. Құрамалы қалақшалардың аэр...дельдеу; ...ық сипаттамаларын есептеу әдістемесі;
2. Құрамалы ЖЭҚ орай ағуын м...перименттік
3. Тәуелділіктерді зерттеудің экс...торының Ж... нәтижелері:

- екі және үш қалақты жел генера...құрамалы ...ЭПҚ;
- Рейнольдс санынан ... ...қалақшалардың аэродинамикалық коэффициенттері;
- ...айлық кедер...
- Рейнольдс санының ЖЭҚ маң...інің тарту күші күші коэффициентінің мәніне әсері;
- Рейнольдс санынан ЖЭҚ макет...р «Қазіргі ...шінің коэффициентінің тәуелділігі

Жоғарыда баяндалған нәтижеле...оқу үдерісі...наманғы жел энергетикасының негізгі принциптері мен мәселелері» пәнінің ...агистранттарде, «7М07104 - Жылу энергетикасы» білім беру бағдарламасы бойынша ма... ...ға дәріс және практикалық сабақтар өткізу кезінде пайдаланылды. ...у келесідей

Көрсетілген нәтижелерді пайдала...асының нә... мүмкіндіктерге ие:

- «Қазіргі заманғы жел энергети...ру бағдарл...гізгі принциптері мен мәселелері» - «7М07104-Жылу энергетикасы» білім бе... ...амасы бойынша магистр мамандарды даярлау деңгейін арттыру.

Физика-техничкалық факультетін... ...ің
деканы Сериков Т.М.

Профессор Ж.С.Ақылбаев атындағ... ...ы
инженерлік жылу физикасы кафедрасыны...
меңгерушісі Дюсембаева А.Н.

ҚОСЫМША Ә

«Құрамалы қалақшалары бар көлденең осьтік жел электр қондырғысы» пайдалы модельге Патент

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 9072

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2024/0205.2

(22) 14.02.2024

(45) 14.02.2025

(54) Құрамалы қалақшалары бар көлденең осьтік жел электр қондырғысы
Горизонтально-осевая ветроэнергетическая установка с комбинированными лопастями
Horizontal-axial wind power plant with combined blades

(73) Танашева Назгуль Кадыралиевна (KZ)
Tanasheva Nazgul Kadyraliyevna (KZ)

(72) Дюсембаева Айнура Нуртаевна (KZ)
Танашева Назгуль Кадыралиевна (KZ)
Тлеубергенова Акмарал Жарылхасынқызы (KZ)
Ботпаев Нурлан Кадырбекович (KZ)
Мұхамедрахим Алмат Рамазанұлы (KZ)

Dyusembaeva Ainura Nurtayevna (KZ)
Tanasheva Nazgul Kadyraliyevna (KZ)
Tleubergenova Akmaral Zharylkhasynkyzy (KZ)
Botpaev Nurlan Kadyrbekovich (KZ)
Mukhamedrakhim Almat Ramazanuly (KZ)

ҚР Ұлттық зияткерлік меншік институты РМК

ЭЦҚ кол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Оспанов
Е. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚОСЫМША Б

Т-1-М аэродинамикалық құбырдың бейне суреті

ҚОСЫМША В

Тәжірибеде айналмалы цилиндрдің бұрыштық жылдамдығын сандық АТ-8 фототахометрмен анықталады.

1 кестеде сандық АТ-8 фототахометрдің техникалық параметрлері көрсетілген.

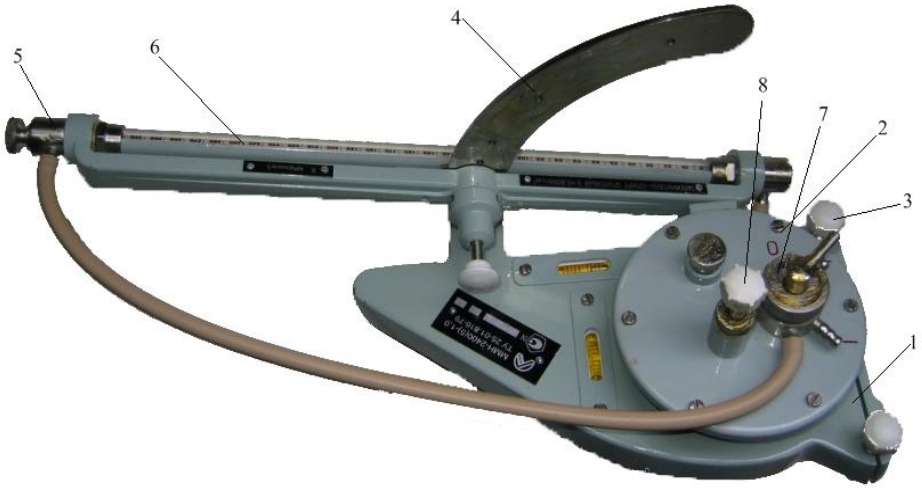
1 кесте

Сандық АТ-8 фототахометрдің техникалық параметрі

Параметрлер	Анықтамасы
Экран	Бес разрядты СК-экран
Дәлдік	±(0,05%+1)
Түйіскен өлшеу диапазон	2 ден 20 000 айн/мин
Түйіспеген өлшеу диапазон	2 ден 99 999 айн/мин
Айналу диапазоны	1 ден 99 999
Тез әсер етуі	0,5 сек. (120 айн/мин жоғары)
Өлшеу қашықтығы	50 ден 500 мм
Жетекші генератор	Кварцты кристалл
Қолдану токы	Шамамен 45мА
Батарея	9В
Жұмыс температурасы	0^0С ден 50^0С

ҚОСЫМША Г

ММН-240 микроманометрі



1-микроманометрдің негізі; 2-резервуар; 3-микроманометрдің горизонталь деңгейін реттейтін винт; 4-кронштейн бекітілетін доға; 5-кронштейн; 6-сұйық деңгейін көрсететін түтікше; 7-өлшегіш түтікшелер жалғанатын орын; 8-кронштейнге орнатылған түтікшедегі сұйықтың деңгейін нольге келтіретін винт

ҚОСЫМША Ғ

Серіппелі динамометр - күш моменті мен күшті өлшеуге мүмкіндік беретін құрылғы.

Ол күштік датчик пен санау құрылғысынан тұрады. Датчик күшті өлшейді, осы уақытта санау құрылғысы өлшенген күштің мәнін көрсетеді. Серіппелі динамометрдің винттік серіппе күштік датчик ролін атқарады. Оның жұмыс істеу принципі серіппе созылғанда деформацияланады, ол деформация дәрежесін өлшеуге мүмкіндік береді. Деформация дәрежесі серіппе күшіне әсер етеді. Серіппелі типті қондырғымен дәнекердің төзімділігін өлшегенде қолданады. Құрылғы Ньютон долясынан 1 Мн-ға дейін өлшеуге мүмкіндік береді.

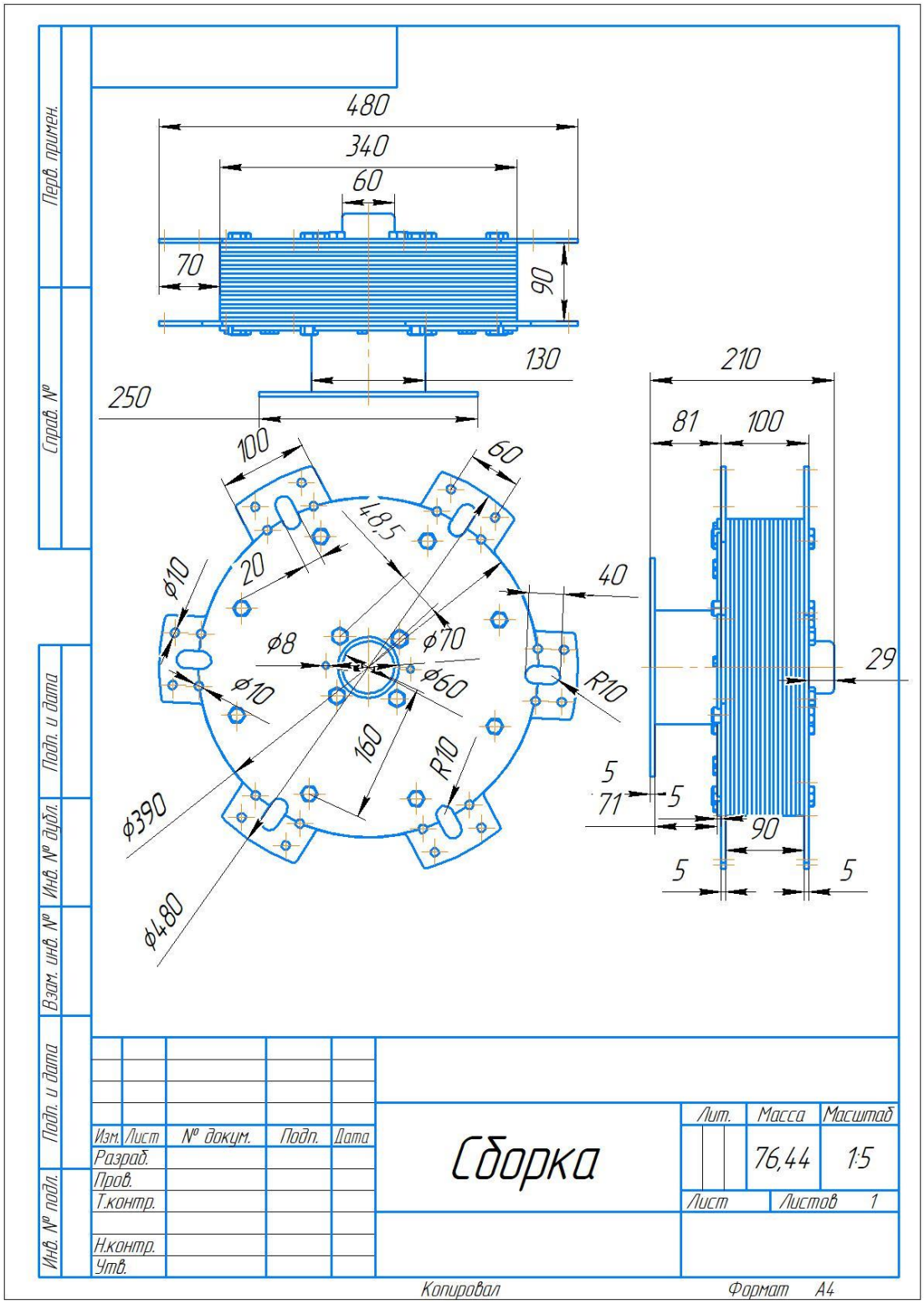
Серіппелі динамометрде күштік датчиктің рөлін винттік серіппе орындайды. Оның жұмыс істеу принципі мынаған негізделген: серіппе өзінің созылған кезінде деформацияланады және деформация дәрежесін өлшеуге мүмкіндік береді.

ҚОСЫМША Д

Тәжірибеде ауа ағын жылдамдығын өлшеу үшін GEOS № 11 анемотетрі қолданылды.

2 кесте
GEOS № 11 анемометрінің негізгі параметрлері

Анемометдің жалпы техникалық параметрлері	
Ағын жылдамдығы	ағымдағы, орташа, максималды
Температура	ағымдағы, минималды, максималды қоңыр жел, минималды қоңыр жел
Ылғалдылық	ағымдағы салыстырмалы, минимум, максимум, шық нүктесі, қызу индексі
Қысым	абсолюттік, салыстырмалы, жердің қысымы, қысым үрдісі
Компас	сандық, аналогты
Көрсеткіштің жазылуы	қолдық және автоматтық
Анемометр мөлшері	46х120х32 мм
Өлшем бірлігі	км/сағ, мили/сағ, м/с, ф/с, Боффорта шкаласы бойынша балдар
Жұмыс температурасының ауқымы	-30^0С дан $+60^0$С
Салмағы	50 грамм

ҚОСЫМША Е

Үш фазалы электр генераторы