

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMY KENGASH**

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR
SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI INSTITUTI**

HAMDAMOV MUZAFFAR MUXIDDINOVICH

**AERODINAMIK TADQIQOTLAR ASOSIDA VERTIKAL O'QLI
SHAMOL GENERATORINI ISHLAB CHIQISH VA UNING OPTIMAL
PARAMETRLARINI ANIQLASH**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA DOKTORLIK (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Doktorlik dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the thesis of doctoral dissertation

Hamdamov Muzaffar Muxiddinovich

Aerodinamik tadqiqotlar asosida vertikal o'qli shamol generatorini ishlab chiqish va uning optimal parametrlarini aniqlash3

Хамдамов Музаффар Мухиддинович

Разработка и определение оптимальных параметров ветрового генератора с вертикальной осью вращения на основе аэродинамических исследований....29

Hamdamov Muzaffar Muhiddinovich

Development and determination of optimal parameters of a vertical axis wind generator based on aerodynamic studies55

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works59

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMY KENGASH**

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR
SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI INSTITUTI**

HAMDAMOV MUZAFFAR MUXIDDINOVICH

**AERODINAMIK TADQIQOTLAR ASOSIDA VERTIKAL O'QLI
SHAMOL GENERATORINI ISHLAB CHIQISH VA UNING OPTIMAL
PARAMETRLARINI ANIQLASH**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA DOKTORLIK (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.DSc/T772 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi M.T.O‘razboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.instmech.uz) va "Ziyonet" axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Xujayev Ismatulla Kushayevich

texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Navruzov Kuralbay

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Xalikov Salixdjan Subxanovich

texnika fanlari doktori, dotsent

Normurodov Chori Begaliyevich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti huzuridagi fan doktori ilmiy darajasini beruvchi DSc.02/30.12.2019. T/FM.61.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil “27” avgust” soat 14:00 dagi majlisida bo‘lib o‘tadi (Manzil: 100125, Toshkent, Do‘rmon yo‘li ko‘chasi, 40, 428-majlislar zali. Tel: (99871) 262-71-52; Faks: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Dissertatsiya bilan Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (32 raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent sh., Do‘rmon yuli ko‘chasi, 40-uy. Tel.: (99871) 262-71-52).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «15» avgust kuni tarqatildi.
(2025 yil «14» avgust 32 raqamli reyestr bayonnomasi)

M.M.Mirsaidov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, t.f.d.,
professor, O‘zR FA akademigi

F.F.Adilov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi,
PhD, k.i.x.

Z.M.Malikov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor

KIRISH (doktorlik (DSc) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda elektr energiyaga bo'lgan talab ortib borayotgani sababli, qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish kengayib bormoqda. 2024 yilda qayta tiklanadigan energiya manbalari dunyoda ishlab chiqarilgan elektr energiyasining 33,5 foizini tashkil qildi va uning 8,6 foizi shamol elektr stansiyalariga to'g'ri keldi. Markazlashgan elektr ta'minotidan yiroqda joylashgan hududlarda va kichik quvvat talab etuvchi iste'molchilarni ta'minlashda shamol energiyasidan foydalanishga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda elektr energiyaning salmoqli qismini qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish orqali olinayotganligi muhim ahamiyat kasb etmoqda. Xalqaro qayta tiklanuvchi energiya agentligi (IRENA) tomonidan ishlab chiqilgan shamol energetikasini rivojlantirish konsepsiyasiga ko'ra, 2050 yilga kelib, shamol energetikasi dunyodagi energiya ehtiyojining 35 foizini qondiradi. Agentlik ta'kidlashicha, 2023 yilda qayta tiklanadigan energiya manbalarining umumiy o'rnatilgan quvvati yangi rekord daraja – 3870 gigavattga yetdi. 2024 yilda ishga tushirilgan yangi energiya quvvatlarining 86 foizi qayta tiklanadigan energiya manbalariga tegishli bo'ldi. Bu borada, jumladan past shamol tezliklarida ishlovchi vertikal o'qli shamol turbinasini yaratishga va uning samaradorligini oshirishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda kichik tezlikli shamol oqimlaridan foydalanuvchi vertikal o'qli shamol energetik qurilmalarini ishlab chiqish, energetik, aerodinamik va konstruktiv parametrlarini asoslashga doir ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan, kuchsiz shamol oqimili hududlarning iqlim sharoitlariga moslashtirilgan vertikal o'qli shamol energetik qurilmalarini ishlab chiqish, konstruktiv va ish rejim parametrlarini yaxshilash, shamol energiyasidan foydalanish samaradorligini oshirish hamda takomillashtirishga katta e'tibor berilmoqda. Harakatdagi shamol turbinasi aerodinamikasini o'rganish, turli tezliklarda kutiladigan qarshilik kuchi, hosil bo'ladigan kuch momenti va ishlab chiqariladigan elektr energiyasi quvvatini ilmiy bashoratlash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda so'nggi yillarda sanoat va maishiy sohalarda energiya manbalaridan foydalanish samaradorligini oshirish, iqtisodiy jihatdan samarali texnologiyalarni joriy etish hamda qayta tiklanadigan energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha ko'plab ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu yo'nalishda shamol energiyasidan foydalanish imkoniyatlarini kengaytirish, jumladan, hududlar shamol energiyasining texnik va yalpi potensialini baholash va shunga muvofiq shamol energetik qurilmalarini ishlab chiqish bo'yicha tizimli ishlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»¹ hamda

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida”gi Farmoni.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 16 fevraldagi PQ-57-son “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejavchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorida “...2023-yil uchun 2100 MVt quvvatli yirik quyosh va shamol elektr stansiyalarini ishga tushirish...” bo‘yicha vazifalar belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni amalga oshirishda, mintaqaning iqlim sharoitlari, shamol energiyasi potensialini hisobga olib, vertikal o‘qli shamol energetik qurilmasini yaratish hamda uning ilmiy-texnik yechimlarini ishlab chiqish muhim ahamiyat kasb etadi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada O‘zbekiston Respublikasining 2019 yil 21 maydagi O‘RQ-539-son “Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish to‘g‘risida”gi Qonuni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 9 sentabrdagi PF-220-son “Energiya tejavchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi Farmoni, 2018 yil 28 apreldagi PQ-3687-son “Qayta tiklanadigan energiya manbalari sohasida investitsiya loyihalarini amalga oshirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son “Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejavchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanadigan energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarini rivojlantirishning IV. “Matematika, mexanika va informatika” ustuvor yo‘nalishiga mos ravishda bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi¹.

Shamol energetikasi bo‘yicha tadqiqotlar dunyoning ko‘plab ilmiy markazlari va universitetlarida jumladan, University of California, Berkeley, University of Cambridge, Institute of Thermodynamics and Mechanics (TU Darmstadt, Germaniya), Institute of Fluid and Gas Dynamics (TU Dresden), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich), National Aeronautics and Space Administration (NASA), University of Massachusetts, Penn State University, Oregon State University, University of Florida, Tsinghua University (Xitoy), shuningdek, Rossiya Federatsiyasidagi ilmiy markazlarda: Markaziy aerogidrodinamika instituti (TsAGI), Moskva aviatsiya instituti (MAI), Sankt-Peterburg davlat texnika universiteti (SPbDTU), Tomsk davlat universiteti (TDU), Moskva davlat fuqaro aviatsiyasi texnika universiteti (MGTU GA), A.M.Obuxov nomidagi atmosfera fizikasi instituti, N.E.Bauman nomidagi Moskva davlat texnika universiteti, RFA Ufa federal ilmiy markazi, S.S.Kutateladze nomidagi

¹ Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>; Journal of Approximation Theory, Applied Mathematics and Computation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; Journal of Computational and Applied Mathematics <http://www.journals.elsevier.com/mathematics/>; Publish in Scientific Reports; Calcolo, Numerical Algorithms, BIT Numerical Mathematics, *Хисоблаш математикаси ва математик физика журнали*, <http://www.springer.com/mathematics> va boshqa manbalarda materiallari asosida amalga oshirilgan.

Issiqlik fizikasi instituti (SB RAN) kabi nufuzli ilmiy muassasalarda davom ettirilmoqda. Ushbu tadqiqotlar shamol turbinalarining aerodinamikasini chuqurroq tushinish, ularning ish samaradorligini optimallashtirish va energiya ishlab chiqarish unumdorligini oshirishga qaratilgan.

Yangi shamol turbinalarini yaratish uchun ularning turbulent oqim bilan oqib o'tilishi aerodinamikasini aniqlashda katta ahamiyatga ega bo'lgan turbulent modellarni qo'llab modellashtirishga doir ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bugungi kunda SST (shear stress transport – siljish kuchlanishining ko'chishi) va LES (large eddy simulation – yirik uyurmalarini modellashtirish) kabi modellar keng qo'llanilib, shamol turbinalari ishchi sirtlarining oqib o'tilishini chuqur tahlil qilish imkonini bermoqda.

Past shamol tezligida ham samarali ishlaydigan qanotlar shakllari ishlab chiqilmoqda. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, qanotlar qiyalik burchagini o'zgartirish, uzunlik va diametr nisbatini optimallashtirish hamda turli turbinalarni kombinatsiya qilish (masalan, Savonius va Darrieus turbinalari) orqali turli shamol tezliklarida yuqori samaradorlikka erishish mumkin (NASA, Moskva davlat fuqaro aviatsiyasi texnika universiteti va boshqalar).

Shamol turbinalari atrofidagi havo oqimini sonli va tabiiy modellashtirish, shuningdek, ularning konstruktiv xususiyatlarini yaxshilash bo'yicha ishlar faol olib borilmoqda (MAI, SPbDTU, University of California, Berkeley, TU Darmstadt, TU Dresden, Shveytsariya Oliy texnika maktabi (ETH Zurich), AQShning National Renewable Energy Laboratory (NREL) va Daniyaning DTU Wind Energy – Technical University of Denmark).

Shamol energetik uskunalarning barqarorligi va samaradorligini oshirish (Siemens, Vestas, GE Renewable Energy), ishchi qanotlarning kuch xarakteristikalarini yaxshilash va shovqinni pasaytirish (NREL, DTU Wind Energy) borasida ishlar olib bormoqda. Tadqiqotchilarning asosiy e'tibori katta quvvatli shamol energetik uskunalari ishlab chiqishga qaratilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Shamol energetikasi sohasining rivojlanishida dunyoning ko'plab olimlari va muhandislari hissa qo'shishgan. Rossiyada bu sohada peshqadamlardan biri N.E.Jukovskiy bo'lib, u XX asrning boshlarida qishloq xo'jaligi uchun TsAGIda dastlabki shamol-elektr stansiyalari va shamol turbinalarini ishlab chiqishni tashkil qilgan. N.E.Jukovskiy bilan birga shamol energetikasi nazariy asoslarning yaratilishiga katta hissa qo'shgan sovet olimlari va muhandislari qatoriga N.V.Krasovskiy, G.H.Sabinin, E.M.Fateev, R.V.Sektorov, N.V.Vashkevich, V.V.Sidorov va boshqalar kiradi.

Shotlandiyalik fizik Jeyms Blayt 1887 yilda birinchi ishlaydigan shamol elektr generatorini yaratdi. Xalqaro miqyosda shamol energetikasining rivojlanishiga daniyalik muhandis Paul la Kur va amerikalik muhandis Charls F. Brash kabi olimlar katta hissa qo'shdilar. Paul la Kur XX asrning boshlarida shamol energiyasidan elektr energiyasi ishlab chiqarish bo'yicha tadqiqotlar olib borgan. Charls F. Brash esa 1888 yilda birinchi avtomatik shamol elektr stansiyasini qurdi.

Nemis fizigi Albert Betts shamol turbinalari nazariyasining asosiy prinsiplarini ishlab chiqqan va shamol energiyasining maksimal 59,3% elektr

energiyasiga aylantirilishi mumkinligini isbotlagan. Germaniyalik muhandis Ulrix Xyutter yengil va samarali shamol turbinalarini loyihalab, zamonaviy yuqori samarali konstruksiyalarning asosini qoʻygan. Henrik Stiesdal 1980 yillarda shamol turbinalarining rotorlarini, generator tizimlarini va reduktorlarini takomillashtirish bilan shugʻullangan. Dengiz muhandisi va shamol energetikasi boʻyicha tadqiqotchi Uilyam E. Heronemus dunyoda birinchi boʻlib dengiz shamol turbinalarining konsepsiyasini taklif qilgan. Ingliz muhandisi Hubert Medows turli ishchi profillari bilan shamol turbinalarining samaradorligini oʻrganish orqali rotorli mashinalar nazariyasini ishlab chiqishga katta hissa qoʻshgan. Edwin Gray 1950–1970 yillarda shamol turbinalarining aerodinamikasini tajriba tadqiqotlar orqali oʻrgangan.

Avtonom, kichik quvvatli yangilanadigan energiya tizimlarida qoʻllaniladigan elektr generatorlari nazariyasini asoslash va takomillashtirish borasida M.A.Grigoryev, V.I.Zagradyskiy, S.A.Kharitonov, B.S.Zechikhin, M.V.Pronin, S.G.Obukhov, E.I.Zabudskiy, I.P.Kopylov, P.Yu.Grachev, I.M.Kirpichnikova, M.L.Kostyrev, V.G.Nikolaev, E.V.Solomin, V.I.Buyalskiy, I.E.Tamm, shuningdek, xalqaro olimlar M.M.Jovanović, K.Yamazaki, Sul Ademi, Henk Polinder, Alejandro Rolán va boshqa koʻplab taniqli olimlar ish olib borishgan.

Jeyson Jonkman (NREL) ishlab chiqqan FAST va OpenFAST dasturiy modellari turbinlarning ishlashini optimallashtirishda qoʻllanilgan. Shuningdek, u dinamik yuklanishlarni oʻrganib, shamol turbinalarining uzoq muddatli ishlashini taʼminlashga erishgan. Pol Virs (Sandia National Laboratories, AQSh) shamol turbinalari tuzilmalarini optimallashtirish va materiallarini yaxshilash boʻyicha tadqiqotlar olib borgan.

Chjenxua Tsyen elektr tizimlarini boshqarishni optimallashtirish va barqaror elektr energiyasi ishlab chiqarishni taʼminlovchi algoritmlar ishlab chiqish bilan shugʻullangan. Maykl Muskulus (Norvegiya fan va texnologiya universiteti, NTNU) shamol turbinalari ishchi sirtlarining shakli va aerodinamik xususiyatlarini oʻrgangan. U havo oqimlarini chuqur tahlil qilgan va energiya ishlab chiqarish samaradorligini oshirish usullarini ishlab chiqqan.

Oʻzbekistonda alternativ va anʼanaviy energiya manbalariga doir keng miqyosdagi tadqiqotlarni jumladan, Q.R.Allayev, R.A.Zohidov, U.A.Tojiev, O.Z.Toirov, S.S.Xalikov, N.N.Sadullaev, A.B.Safarov, K.T.Alimxoʻjaev, Sh.K.Alimxoʻjaev, T.Nosirov, A.Vasikov, Sh.N.Nematov, D.M.Pulatova va U.G.Dehqonov kabi yetakchi olimlar olib borishmoqda. Energiya tizimlaridagi oqimlarning aero- va gidrodinamikasi bilan bogʻliq masalalar boʻyicha esa X.A.Raxmatulin, J.F.Fayzullaev, K.Sh.Latipov, R.Sadullayev, A.A.Hamidov, I.K.Xujayev, B.X.Xoʻjayorov, K.Navruzov, N.Ravshanov, Z.M.Malikov kabi mahalliy olimlar tadqiqot olib borishgan va olib borishmoqdalar.

Biroq past potentsialli shamol resurslaridan samarali foydalanish imkonini beruvchi vertikal oʻqli shamol energetik qurilmalariga doir ilmiy tadqiqotlar yetarli darajada oʻtkazilmagan. Shuning uchun yangi turdagi shamol turbinalarini yaratish va ularni takomillashtirish boʻyicha ilmiy tadqiqotlarni davom ettirish zarur.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarini bilan bogʻliqligi. Dissertatsiya

tadqiqoti O‘zR FA Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining ilmiy-tekshirish ishlar rejasiga asosan IL-21071166 «Past shamol tezliklarida ishlaydigan vertikal o‘qli shamol turbinasini ishlab chiqish» (2022-2024 yillar) mavzudagi grant doirasida bajarildi.

Tadqiqotning maqsadi shamolning kichik tezliklarida samarali ishlay oladigan, radial karkas va stopperli yassi qanotlarga ega bo‘lgan vertikal o‘q atrofida aylanuvchi shamol generatorini ishlab chiqish, nazariy va tajriba sinovlari o‘tkazish yo‘li bilan uni optimalashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

vertikal o‘qli shamol qurilmalarini ishlab chiqish va ularning past shamol oqimlarida samaradorligini oshirishga bag‘ishlangan ilmiy ishlarni o‘rganish;

shamolning kichik tezliklarida samarali faoliyat ko‘rsatadigan, vertikal aylanish o‘qi va harakatlanuvchi ishchi elementlarga ega shamol energiya qurilmasini ishlab chiqish;

shamolning turli tezliklari, ishchi yuzaning maydoni, inersiya momenti va ishlab chiqarilgan elektr energiyasi quvvatiga bog‘liq ravishda shamol energetik qurilmasi(ShEQ)ni ishga tushirish jarayonini nazariy tadqiq qilish;

taklif etilgan vertikal o‘qli shamol turbinalari konstruksiyalarini stend va tabiiy sharoitlarda sinovdan o‘tkazish;

vertikal o‘qli shamol turbinasi aerodinamikasini o‘rganish asosida uning o‘lchamlari va konstruksiyasini optimallashtirish;

vertikal o‘qli shamol energetik qurilmalarining texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlarini aniqlash va joriy etilishining iqtisodiy samaradorligini baholash.

Tadqiqotning obyeksi sifatida shamol energiyasidan elektr energiyasi ishlab chiqaradigan shamol turbinalari qaraldi.

Tadqiqotning predmetini shamol energiyasi qurilmasining ekspluatatsiya sharoiti va konstruksiyasidan bog‘liq holdagi aerodinamikasi, aylanish momenti va ishlab chiqarayotgan elektr quvvati tashkil etishdi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot olib boorish jarayonida matematik modellashtirish va hisoblash gidrodinamikasi usullari, shuningdek, aerodinamika va fizikaning tajriba usullari qo‘llanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

turli ataka burchaklarida profillarning aerodinamik xususiyatlari zamonaviy turbulentslik modelidan foydalangan holda tahlil qilinib, oqim tezligi maydoni, bosim taqsimoti hamda ko‘taruvchi kuch koeffitsienti aniqlangan hamda eng yuqori ko‘taruvchi kuchni ta‘minlovchi optimal ataka burchagi $\alpha=8^\circ$ ekanligi va shu burchakda eng yuqori samaradorlikka erishilishi aniqlangan;

vertikal o‘qli shamol energetik qurilmasi harakati turbulentslikning standart $k-\varepsilon$ va SST modellari asosida modellashtirilgan, turli ataka burchaklarida bosim, tezlik, ko‘taruvchi va qarshilik kuchlari orqali qurilmaning optimal parametrlari aniqlab olingan hamda konstruksiyasi ishlab chiqilgan;

ilk marotaba mahalliy xomashyo va materiallar asosida tayyorlangan, konstruktiv jihatdan yangicha yechimga ega bo‘lgan, parraklari ramaga podshipniklar orqali mahkamlangan va holati shamol oqimi yo‘nalishiga bog‘liq

holda avtomatik tarzda ochilib-yopilib turish qobiliyatiga ega bo'lgan vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi ishlab chiqilgan (FAP 20241465, IAP 7811);

shamol oqimi tezligining o'zgarishi, turbinaning diametri, parraklar soni, ularning aerodinamik uzunligi va balandligi, parraklarning shamol yo'nalishiga nisbatan og'ish burchagi, shuningdek, parraklarga ta'sir etuvchi kuchlar hisobga olingan holda balans tenglamalari asosida qurilmalarning shamol energiyasidan foydalanish koeffitsiyentini aniqlashga imkon beruvchi matematik model ishlab chiqilgan;

vertikal o'qli shamol energetik qurilmasini ishga tushish jarayoni shamol oqimining tezligi, ishchi sirtning yuzasi va ishlab chiqarilayotgan elektr quvvatini hisobga olgan holda sonli modellashtirilgan hamda turbina momenti, ishlab boshlashning minimal tezligi va turg'un ish rejimiga o'tish vaqtining davomligi aniqlanib, ushbu ko'rsatkichlarga mos keluvchi reduktor va elektr generatorini tanlash uchun tavsiyalar ishlab chiqilgan;

yaratilgan yangi vertikal o'qli shamol energetik qurilmasining o'lchamlarini optimallashtirilishi hisobiga 3–4 m/s tezlikda ham elektr energiyasi ishlab chiqarishi, hamda u an'anaviy qurilmalarga nisbatan material sarfi, shovqin darajasi va aylanish momenti bo'yicha ustunlikka egaligi, samaradorligi o'rtacha 3–10% ga yuqori ekanligi tasdiqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

markaziy elektr tarmog'iga ulanmagan chekka hududlardagi kichik quvvatli iste'molchilarga mo'ljallangan, mahalliy xomashyodan foydalanib tayyorlangan, samarador shamol energetik qurilmasi ishlab chiqilgan;

yaratilgan dasturiy ta'minot yordamida shamol turbinasining optimal konstruktiv parametrlari aniqlagan va kichik shamol tezliklarida ham samarali ishlaydigan qurilma ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi vertikal o'qli shamol turbinalari aerodinamikasi bo'yicha nazariy va stend sinovlarining zamonaviy turbulentslik modellaridan, CFD va o'lchov texnikalaridan foydalanilgan holda yuqori aniqlikda amalga oshirilganligi va olingan natijalarning sinov natijalari ko'rsatkichlariga mos kelishi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kichik shamol tezliklarida ishlaydigan, harakatlanuvchi ishchi qanotchalariga ega yangi turdagi vertikal o'qli shamol turbinalari aerodinamik va energetik xususiyatlarini o'rganilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati vertikal o'q atrofida aylanuvchi shamol qurilmasining yanada mukammalroq konstruksiyasini yaratishga imkon berdigan laboratoriya va natural tadqiqotlarni olib borish uslubiyati ishlab chiqilgani bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Vertikal shamol energetikasi qurilmasining samaradorligini oshirish va joriy etish jarayonida olingan ilmiy natijalar asosida:

kichik tezlikli shamol oqimlarida samarali ishlashga moslashtirilgan vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi uchun O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi

Intellektual mulk agentligidan patent olingan (FAP 20240465, IAP 7811). Natijada qurilmaning shamol energiyasidan foydalanish koeffitsiyenti C_p ni 3...10 foizgacha oshirish imkoniyati yaratilgan;

kichik tezlikli shamol oqimlarida ishlovchi vertikal o'qli shamol energetik qurilmasining konstruksiyasi takomillashtirilgan hamda Toshkent shahri Mirzo Ulug'bek tumanida Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida joriy etilgan (O'zbekiston Respublikasi Milliy elektr tarmoqlari AJning yil 18 martdagi № 01-04-36/1342 2024 ma'lumotnomasi). Natijada shamol tezligi 3-10 m/s bo'lgan oraliqda ham elektr energiyasini ishlab chiqarish imkoniyati yaratilib, qurilmaning material sarfi va shovqini kamaytirilib, iste'molchining energiya ta'minoti uzluksizligini ta'minlashga erishilgan;

ishlab chiqilgan vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi Toshkent viloyati Parkent tumanida "Quyosh qo'rg'oni"da joriy etilgan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Materialshunoslik institutining 2024 yil 20 oktabrdagi № 01-186 ma'lumotnomasi). Natijada tarmoqdan olinadigan elektr energiyasi sarfi 5–10% ga kamaygan;

ishlab chiqilgan vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi Buxoro viloyati Olot tumanidagi 10-sonli oilaviy poliklinikaga joriy etilgan (Olot tuman hokimiyatining 2023 yil 18 oktabrdagi № 04-6286 ma'lumotnomasi). Natijada poliklinika uzluksiz elektr energiyasi bilan ta'minlangan va tarmoqdan olinayotgan elektr energiyasi sarfi 5–9% ga kamaygan.

Tadqiqot natijalarining aprobsiyasi. Tadqiqot natijalari 8 ta xalqaro va 5 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Tadqiqot mavzusida jami 36 ta ilmiy ish, jumladan 2 ta monografiya, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini nashrga tavsiya etilgan 15 ta xorijiy va 7 ta respublika jurnallarida maqolalar chop etilgan. Foydali modelga patent uchun ariza berilgan va 3 ta dasturiy mahsulotlar ro'yxatdan o'tkazilgan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 196 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining zarurati va dolzarbligi O'zbekiston Respublikasining ilm-fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiq asoslab berilgan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot obyekti va predmeti ko'rsatilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslab berilgan, ilmiy yangilik hamda tadqiqotning amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati bayon etilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga tatbiq etish ro'yxati, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tarkibi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobida "**Shamol energiyasidan foydalanish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar va texnik ishlanmalar holatining tahlili**" keltirilgan.

§1.1 da shamolning asosiy xususiyatlari, jumladan, qutbiy oqimlar va mahalliy shamollar tushunchalari bayon etilgan.

§1.2 da vertikal va gorizontal shamol turbinalarining umumiy tuzilishi tahlil qilingan. Shamol generatori turlari tahlili taqdim etilgan. Shamol generatorining elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun zarur bo'lgan tarkibiy qismlari haqida ma'lumot berilgan va ularning funksiyalari sanab o'tilgan.

§1.3 da shamol energiyasidan foydalanish bo'yicha jahon tajribasi muhokama qilingan. Retrospektiv va istiqbolli tahlil asosida shamol generatorlar yordamida elektr energiyasi ishlab chiqarishning jahon miqyosidagi rivojlanish sur'atlari yoritilgan.

§1.4 da qayta tiklanuvchi energiya manbalari tarkibi va ularning O'zbekistondagi rivojlanish bosqichlari keltirilgan. O'zbekiston Respublikasida shamol energiyasidan foydalanish rivojlanishi muhokama qilingan. Shamol energiyasidan foydalanib elektr energiyasi ishlab chiqarish bo'yicha xalqaro kelishuvlar va uskunalarni o'rnatish mumkin bo'lgan hududlar haqida ma'lumot berilgan. Hozirgi kunda yirik va kichik shamol turbinalari jadal rivojlanayotgani va ularning iqtisodiyotning energetika sohasini yaxshilashga sezilarli hissa qo'shishi ta'kidlangan.

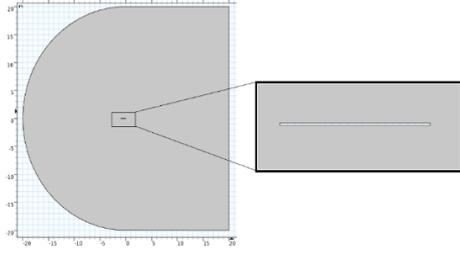
§1.5 da shamol turbinalarining aerodinamikasi bo'yicha tadqiqotlarning tahlili keltirilgan.

Shamol energetik qurilmalarini tadqiq etish va ishlab chiqish bo'yicha mavjud masalalar holatini o'rganish natijasida ushbu dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari shakllantirildi.

Ikkinchi bob "***k-ε* turbulentslik modeli va Cmsol Multiphysics muhitidan foydalanib yupqa yassi to'rtburchakning turbulent oqim bilan oqib o'tilishini modellashtirish**" deb nomlangan. Ushbu bobda Cmsol Multiphysics dasturining standart yechuvchilari yordamida $k - \varepsilon$ turbulentslik modeli doirasida to'rtburchak aerodinamik profilining oqim bilan oqib o'tilishi bo'yicha hisoblash natijalari taqdim etilgan. To'rtburchak profilining oqib o'tilishi Reynold sonlarining $10000 < Re < 2000000$ oralig'ida va ataka burchagining $\alpha = 0^\circ - 20^\circ$ qiymatlarida o'rganildi. Ataka burchagining turli qiymatlari uchun tezlik, bosim va boshqa parametrlar bo'yicha natijalar olindi. Cmsol Multiphysics dasturiy majmuasining qo'llanilishi modelning yaxshi yaqinlashuvi, barqarorligi va yuqori aniqligini namoyish etdi. Ishlatilgan matematik modelning adekvatligi NASA 0012 profilining oqim bilan oqib o'tilishini hisoblash orqali tasdiqlandi, bunda ushbu qo'llanilgan shartlar to'rtburchak profili uchun ham inobatga olindi.

§2.1 da yupqa yassi to'rtburchak plastinkaning kichik ataka burchaklarida bir jinsli turbulent oqim bilan oqib o'tilishini masalasi o'rganildi. Hisoblash uchun ikki o'lchovli sohaning geometriyasi 1-rasmda berilgan.

Plastinka harakatsiz holatda deb qabul qilingan. Kirish chegarasi yarim aylana shaklida olingan bo'lib, u plastinkaga ataka burchagining ruxsat etilgan qiymatlarida qo'zg'almagan oqim chegarasi sifatida qabul qilingan.



1-rasm. Plastinkani oqim bilan oqib o'tilishi sohasining geometriyasi

Yarim aylananing markazi $(0.5;0)$ nuqtada joylashgan bo'lib, uning radiusi 20 metrni tashkil etadi. Bu nuqta plastinkaning oldingi chegarasiga to'g'ri keladi. Yarim aylana va chegaralar uchun shartlar $y = \pm 20 m$ (G_1 chegara) ataka burchagiga bog'liq holda olindi:

$$U(x_{G_1}, y_{G_1}) = u_0 \cos \alpha,$$

$$V(x_{G_1}, y_{G_1}) = u_0 \sin \alpha,$$

$$k(x_{G_1}, y_{G_1}) = \frac{3}{2}(u_0 l_T)^2, \quad \varepsilon(x_{G_1}, y_{G_1}) = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T}, \quad (1)$$

bu yerda u_0 – yo'nalgan oqimning tezlik moduli; α – oqim yo'nalishi bilan OX koordinata o'qi orasidagi burchak.

Ushbu chegarada oshig'ich bosim qiymati nolga teng: $P(x_{G_1}, y_{G_1}) = 0 Pa$. Hisoblash sohasida plastinka $\delta = 0,8$ mm qalinlik va $l = 1$ m uzunlik bilan aniqlangan. Mos ravishda, $G_2 = [(x = 0 \cup x = 1, \cap |y| \leq 0.004)] \cup [(y = \pm 0.004 m) \cap (0 m \leq x \leq 1 m)]$ chegarada $U(x_{G_2}, y_{G_2}) = V(x_{G_2}, y_{G_2}) = 0 m/c$ shartlar berildi.

Hisoblash sohasining chiqish chegarasi $y = 20 m$ (G_3) da tezliklarni aniqlash uchun silliq ulanish sharti qabul qilindi:

$$\frac{\partial U(x_{G_3}, y_{G_3})}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial V(x_{G_3}, y_{G_3})}{\partial n} = 0.$$

Siqilmaydigan suyuqlik oqimining o'rnatilishi jarayoni ko'rib chiqildi. Oqim ikki o'lchamli Navye-Stoks tenglamalari yordamida tavsiflandi:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{\partial \rho U U}{\partial x} + \frac{\partial \rho U V}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} S_{11}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} S_{12}), \\ \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial \rho U V}{\partial x} + \frac{\partial \rho V V}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} S_{12}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} S_{22}). \end{cases} \quad (2)$$

Bu yerda

$$S_{11} = 2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad S_{12} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x};$$

$$S_{22} = 2 \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right); \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t.$$

Turbulentlik modeli sifatida modifikatsiyalangan $k - \varepsilon$ modeli tanlandi:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + U \frac{\partial \rho k}{\partial x} + V \frac{\partial \rho k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \\ &+ G_k + G_b - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_t^2 + S_k; \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \\ &+ \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

bu esa obyektning adekvat tavsiflash imkonin berdi. Bu yerda quyidagi kattaliklardan foydalanilgan: $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$,

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}, U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W),$$

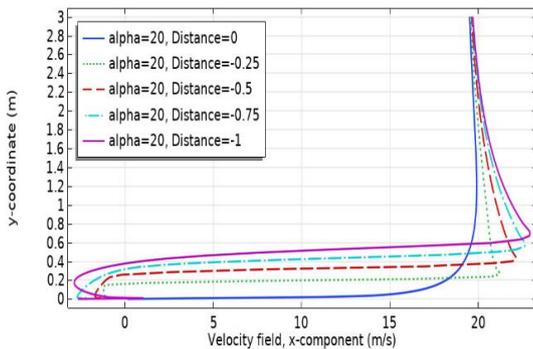
$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, G_b = \beta g_i \frac{\mu_t \partial T}{\text{Pr}_t \partial x_i},$$

$$\text{Pr}_t = 1/a_t, a_0 = 1/\text{Pr} = k/\mu c_p, \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, C_{1\varepsilon} = 1.44,$$

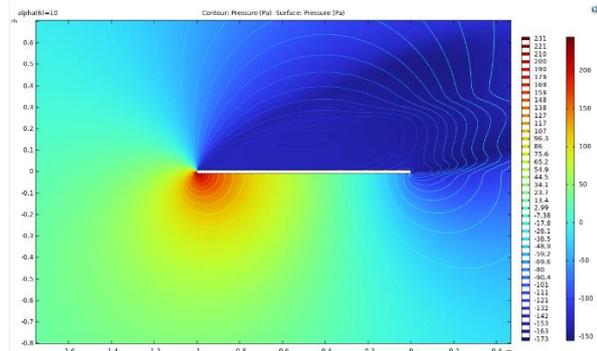
$$C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, A_0 = 4.04.$$

§2.2 da yassi plastinkaning oqib o'tilishi masalasini yechish uchun sonli usul taqdim etilgan. Hisoblashda 60200 ta elementdan iborat to'r ishlatilib, profil yuzasiga yaqin hududlarda zichlangan to'r qo'llanilgan. Boshlang'ich yaqinlashuv sifatida potensial oqim natijalari ishlatilgan.

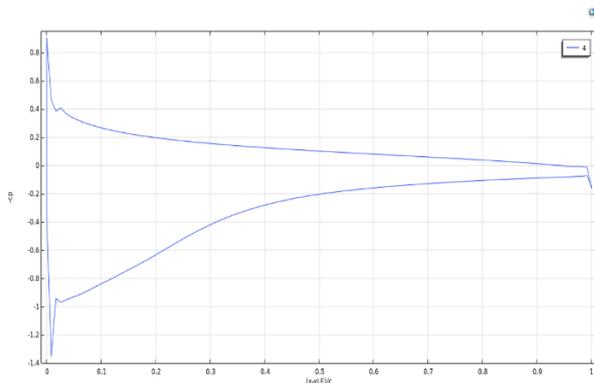
§2.3 da bo'ylama va ko'ndalang tezlik, bosim, turbulentslikning kinetik energiyasi va uning dissipatsiyasi maydonlari aniqlangan hamda hisoblash tajribasi natijalari tahlil qilingan.



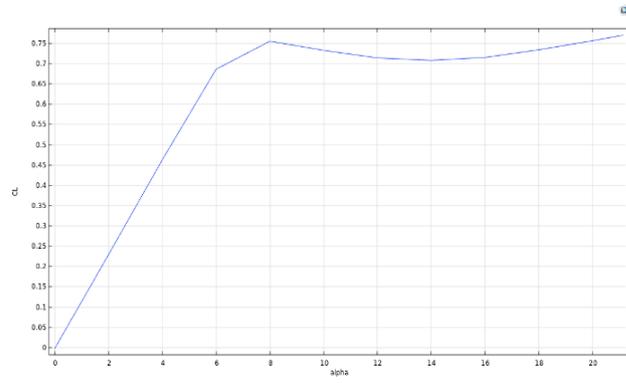
2-rasm. To'g'ri to'rtburchakni oqib o'tishda $x/l = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ kesimlarda bo'ylama tezlik maydoni. $\alpha = 20^\circ$



3-rasm. To'g'ri to'rtburchakni oqib o'tishda bosim maydoni. $\alpha = 10^\circ$



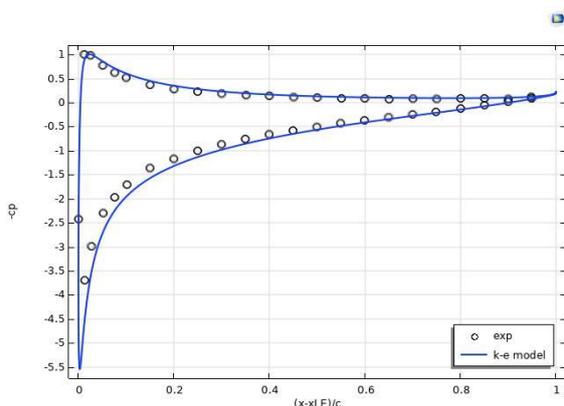
4-rasm. Oqib o'tilayotga to'g'ri to'rtburchak sirtidagi bosim koeffitsienti C_p . $\alpha = 4^\circ$



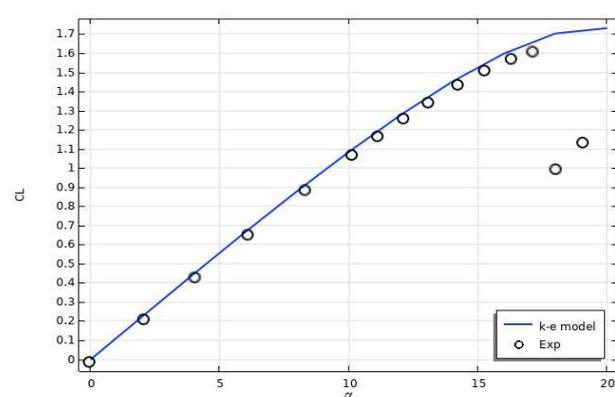
5-rasm. To'g'ri to'rtburchakni oqib o'tishda ataka burchagining ko'taruvchi kuch koeffitsientiga ta'siri

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, ataka burchagi ortishi bilan teskari oqim sohalari (2-rasm), yuqori va past bosim sohalari (3-rasm) yanada yaqqol namoyon bo'ladi. Sirt bosimi koeffitsienti $C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_0^2}$ (4-rasm) grafigining yopiq konturiga mos asosiy xususiyatlar ajratib ko'rsatildi. To'g'ri to'rtburchak uchun ko'rib chiqilgan ataka burchagi intervalida ko'taruvchi kuch koeffitsientining nomonoton o'zgarishi aniqlandi (5-rasm).

NASA 0012 profilining bir jinsli turbulent oqim bilan kichik ataka burchaklarida ($0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$) oqib o'tilishi misolida $k-\varepsilon$ turbulentlik modelini qo'llash mumkinligi hamda Comsol Multiphysics dasturiy majmuasining avvalgi paragrafda keltirilgan shunga o'xshash oqim masalalarini hal qilishdagi imkoniyatlari isbotlandi. Hisob-kitoblar oqimning tezligi 20 m/s va xordaning 1 m uzunligi uchun o'tkazildi. Hisoblash jarayonining barqarorligi Galerkinning eng kichik kvadratlar usuli yordamida ta'minlandi. Bosim koeffitsienti (6-rasm) va ko'taruvchi kuch koeffitsientining (7-rasm, $\alpha = 6^\circ$) NASAning tajriba ma'lumotlari bilan solishtirish natijalari keltirilgan.



6-rasm. $\alpha = 10^\circ$ da NASA 0012 sirti bo'ylab bosim koeffitsientining nazariy va tajriba natijalari

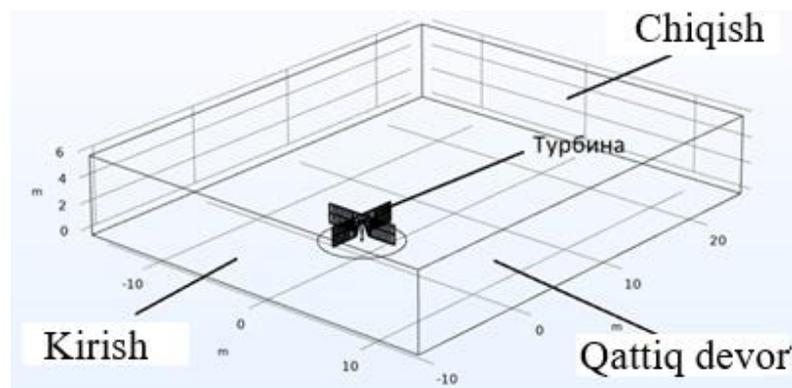


11-rasm. Ataka burchagining NASA 0012 profilini ko'taruvchi kuch koeffitsientiga ta'siri

Dissertatsiyaning uchinchi "Zamonaviy turbulentlik modellari asosida shamol generatorini shamol bilan oqib o'tilishida uch o'lchovli oqim

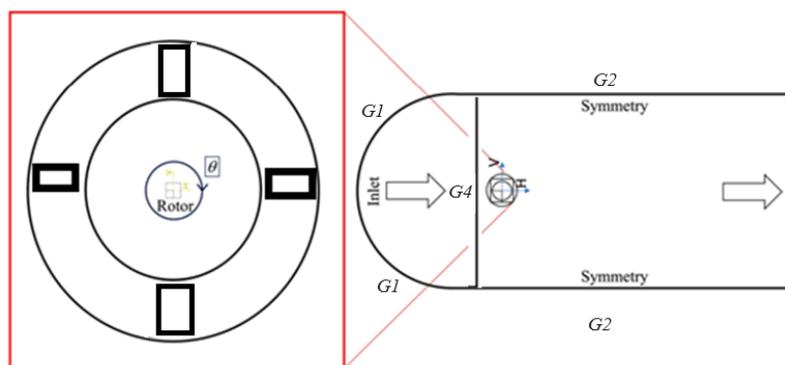
maydonining tadqiqoti" nomli bobida aylanayotgan shamol turbinasi atrofidagi havo oqimining uch o'lchovli sonli modellashtirish natijalari taqdim etilgan. Tadqiqotda tarkibi to'rt prolyotli va vertikal aylanish o'qiga ega bo'lgan shamol energiyasi qurilmasi ko'rib chiqilgan. Ushbu konstruktsiya zamonaviy modellar ichida optimal variant bo'lib, yuqori aylanish tezligi, konstruktsiyaning yaxshi muvozanatlanganligi, harakatining barqarorligi kabi afzalliklarga ega.

§3.1 da vertikal aylanish o'qiga ega bo'lgan uch o'lchovli shamol turbinasining modeli taqdim etilgan (8-rasm). Turbina prolyotining uzunligi – 3 m. Prolyotning pastki chegarasi yer sathidan 0.5 m balandlikda joylashgan.



8-rasm. Shamol turbinasining hisoblash sohasidagi joylashishi

Masalani shakllantirish va yechishda 9-rasmda keltirilgan obyekt geometriyasidan foydalanildi.



9-rasm. Hisoblash sohasining geometriyasi

Uch o'lchovli turbulent havo oqimini modellashtirish uchun massaning saqlanishi qonuni tenglamasi va divergent shakldagi Reynoldsning o'rtalashtirilgan impuls saqlanishi tenglamalari ishlatildi. Hisoblashda standart $k-\varepsilon$ turbulentlik modeli:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (9)$$

hamda SST o'tish modeli qo'llanildi:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \delta_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \gamma G_k - Y_k^* + S_k, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \delta_\omega \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + G_\omega - Y_\omega^* + D_\omega + S_\omega. \quad (11)$$

Turbulent qovushoqlik quyidagi formula asosida aniqlanadi: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

Masala yechimining bir qiymatlilik shartlari shakllantirildi.

$G_1 = (x^2 + y^2 = R^2 \cap x \leq 0)$ da kirish shartlari qo'yildi:

$$U_{G_1} = u_0, V_{G_1} = 0, W_{G_1} = 0, p_{G_1} = 0, k(x_{G_1}, y_{G_1}) = \frac{3}{2}(u_0 l_T)^2, \varepsilon(x_{G_1}, y_{G_1}) = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T}.$$

$G_2 = ((0 \leq x \leq L_x) \cap |y| = L_y)$ chegarada simmetriya shartlari qo'llanildi:

$$\frac{\partial U_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial V_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial W_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial k_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon_{G_2}}{\partial y} = 0.$$

Hisob sohasining $x = L_x$ (G_3) kesimida silliq ulanish shartlari qo'llanildi:

$$\frac{\partial U_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial V_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial W_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial k_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \omega_{G_3}}{\partial y} = 0.$$

Vertikal turbina aerodinamik xarakteristikalarining hisoblash gidrodinamik jarayonlarni sonli modellashtirish (CFD) usullari yordamida Comsol Multiphysics dasturiy paketi orqali amalga oshirildi. Hisoblashlar aylanma harakatni inobatga olib bajarildi, bu esa qo'zg'almagan tezlik maydoni berilganda qurilmaning aerodinamikasini o'rganish imkonini beradi (§3.2).

Turbulentlik modeli tenglamalarini yechish uchun to'liq bog'langan usul (Fully Coupled) tanlandi va bevosita PARDISO yechuvchi algoritmi qo'llanildi (§3.3). Nyuton iteratsion usuli dempifirovchi 0.1 koeffitsiyenti bilan ishlatildi. Maydonni barqarorlashtirish jarayoni 1000 iteratsiyagacha davom etdi. Ruxsat etilgan koeffitsiyent – 1, qoldiq faktor esa 1000 ga teng deb belgilandi. Ushbu parametrlar hisoblash jarayonida aniqlik va samaradorlikning optimal muvozanatini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi.

1-jadval

Burchak α ning oqim sohasidagi bo'ylama va ko'ndalang tezliklarning eng katta va eng kichik qiymatlari

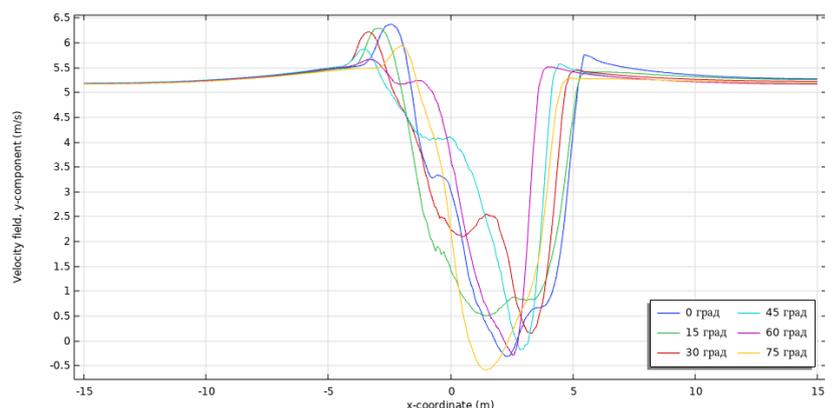
| α burchak, grad | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| U_{\max} (m/s) | 6.1 | 6.49 | 6.38 | 5.87 | 6.4 | 6.95 |
| U_{\min} (m/s) | -0.966 | -0.605 | -1.42 | -3.25 | -5.52 | -6.66 |
| V_{\max} (m/s) | 3.59 | 2.01 | 3.13 | 3.71 | 4.65 | 4.3 |
| V_{\min} (m/s) | -4.12 | -4.06 | -4.36 | -4.99 | -4.2 | -3.96 |

Bosim va tezliklarni moslashtirish sxemasi Nyuton usuliga o'xshash tarzda amalga oshirildi. Impuls va turbulentlik tenglamalari uchun ikkinchi tartibli aniqlikdagi sxema ishlatildi. Yechimning yaqinlashuvi uzliksizlik tenglamasi uchun 10^{-4} , boshqa tenglamalar uchun 10^{-5} mezonlar bo'yicha ta'minlandi.

Dissertatsiya ishida $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ burchak qiymatlarida shamol energiya qurilmasi aylanishi uchun uchta o'zaro perpendikulyar kesimlardagi turli natijalar taqdim etilgan.

1-jadvalda turli α ataka burchagining turli qiymatlarida oqim sohasidagi bo'ylama va ko'ndalang tezliklarning eng katta va eng kichik qiymatlari keltirilgan.

§3.4 da aylanayotgan shamol generatorini oqib o'tishi aerodinamikasi xususiyatlari bo'yicha tadqiqot o'tkazildi. 10-rasmda turli α burchaklarida $x=0$ kesimdagi oqimning bo'ylama tezlik profillari keltirilgan.

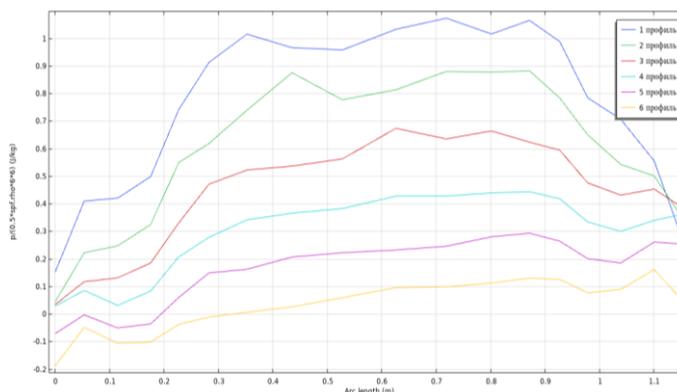


10-rasm. $x = 0$ m da o'rta gorizontol kesimidagi bo'ylama tezlik maydonlari

Xuddi shuningdek, ko'ndalang tezliklar, bosim, uch o'lchovli tezlik moduli, turbulentslikning kinetik energiyasi va uning dissipatsiya maydonlari aniqlandi. Aerodinamik hosilalar sifatida sirt bosimi koeffitsienti C_p va moment koeffitsienti

$$C_m = C_p \frac{g}{\omega L}$$

hisoblab chiqildi.



11-rasm. Vertikal o'qli shamol turbinasi yuqori qatoridagi alohida qanotchalari uchun integrallangan C_p qiymatlari

Natijalar shuni ko'rsatdiki, qanotchalarning aylanish o'qidan uzoqlashishi bilan aylanish momenti ulushi va integrallangan sirt bosimi koeffitsienti C_p ortadi. Ishchi sirtning oqim o'qiga yaqin joylashishi esa vertikal yo'nalishda istalmagan parazit oqimlarning yuzaga kelishiga olib keladi. Ushbu xulosalar (keyingi bobda) vertical o'qli shamol turbinasining konstruksiyasini takomillashtirish uchun asos bo'lib xizmat qildi (§3.5).

Ushbu bobning asosiy natijasi $\alpha = 0^\circ$ da shamol generatorining umumiy quvvatini aniqlash bo'ldi (2-jadval).

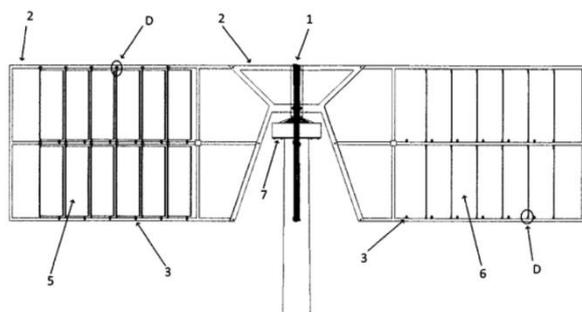
2-jadval

$\alpha = 0^\circ$ da quvvat koeffitsiyentini tajriba ma'lumotlari bilan solishtirish

| Model | C_p |
|----------------------------|-------|
| Standart $k - \varepsilon$ | 0.305 |
| Transition SST | 0.344 |
| Tajriba | 0.352 |

IV bob “Vertikal o‘q atrofida aylanuvchi shamol turbinasi: tajriba namunasining tavsifi, tayyorlanishi va optimallashtirilishi” deb nomlangan.

§4.1 da shamol harakatini elektr energiyasiga aylantiruvchi klapanli qurilma tavsifi berilgan. Ushbu bobning maqsadi yillik o‘rtacha shamol tezligi past (3-8 m/s) bo‘lgan hududlarda samarali ishlay oladigan shamol qurilmasini ishlab chiqish, loyihalash va tayyorlashdan iborat. 12-rasmda IL-21071166 loyiha doirasida IAP 7811 asosida ishlab chiqilgan shamol turbinasining ko‘rinishi keltirilgan.



1 – markaziy o‘q (val); 2 – ramka (karkas);
3 – elastik to‘xtagich; 4 – qaytish to‘xtagichi;
5 – ishchi holatdagi pichoqlar; 6 – ochiq
neytral holatdagi pichoqlar; 7 – mexanizm
qutisi

12-rasm. IAP 7811 asosidagi yaratilgan qurilmaning yon ko‘rinishi:

Vertikal o‘qli shamol turbinasining tajriba namunasi O‘zR FA MISMI mexanik pavilonida ishlab chiqildi (§4.2). Uskuna uchun ishlatilgan barcha materiallar joylarda mavjud bo‘lib, ular sotib olingan.

Vertikal o‘qli shamol turbinasi tajriba namunasining zaif tomonlarini aniqlash va yuritma va generatorni tanlash maqsadida, aylanish momenti va tezligini o‘lchash uchun laboratoriya stendi ishlab chiqildi (§4.3). Tajribalar sun‘iy shamol sharoitida o‘tkazilib, ishchi sirtlarning ikki tomoniga ta’sir etuvchi kuchlar farqi natijasida yuzaga kelgan aylanish momenti qiymati qayd etildi.



13-rasm. Sun‘iy shamol yaratish uchun ishlatilgan ventilyator



14-rasm. Shamol tezligini o‘lchash uchun Vortex anemometri, ma’lumot yozuvchi qurilma va dasturiy ta’minot



15-rasm. Qurilmaning aylanish tezligi va momentini o'lchash uchun magnet ushlagichli qurilmalar to'plami

13-15-rasmlarda laboratoriya stendining asosiy tarkibiy qismlari keltirilgan № IAP 20210140 asosida yaratilgan vertikal o'qli shamol turbinasining laboratoriya sinovlari natijalari §4.4 da keltirildi. Shamolning kritik 1.5 m/s tezligi aniqlandiki, bu tezlikda shamol turbinasi aylanib boshlaydi.

Sun'iy shamol tezligi 3.3-5.5 m/s oralig'ida, vertikal o'qli shamol turbinasi o'qiga qo'yilgan 0-0.5 N*m tormozlovchi moment holi uchun aylanish o'qining burchak tezligi va umumiy kuch moment qiymatlari aniqlandi. 3.3 m/s o'zgarmas shamol tezligida olingan natijalar 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

3.3 m/s shamol tezligida olingan tajriba natijalari

| | | | | | | | | | | |
|---|---|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| Aylanish o'qi bo'yicha umumiy moment kuchi, N*m | 1 | 2.4 | 4.7 | 7.3 | 10 | 18.7 | 21 | 24 | 28 | 32.3 |
| Tormozlovchi kuch momenti kattaligi, N*m | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 |
| Natijaviy burchak tezligi, ayl/min | 5 | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 4 |

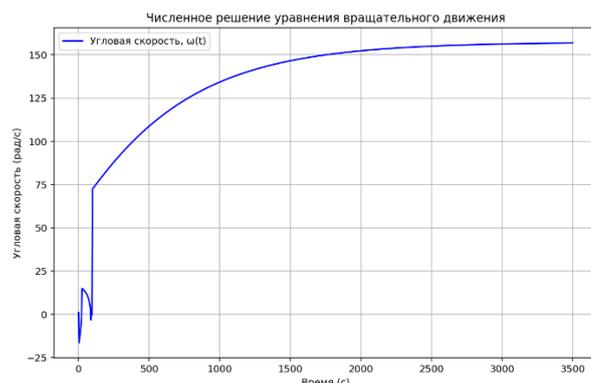
§4.5 da shamol energetik uskunasi ishchi maydoni, shamol tezligi va ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasi quvvatining berilgan qiymatlarida uskunaning ishga tushirish jarayonidagi xususiyatlari quyidagi tenglama asosida sonli o'rganildi:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{aero} - M_{tr} - M_{yuk} \quad (12)$$

Bu yerda qurilmaning umumiy inersiya momenti $I = 4I_{pr} + I_{val}$, bunda $I_{pr} = \frac{1}{12} m_{pr} (L^2 + W^2)$ – bitta prolyotning inersiya momenti massasi $m_{pr} = 17 \text{ kg}$, uzunligi $L = 3 \text{ m}$ va kengligi $W = 1.5 \text{ m}$ uchun hisoblanadi; $I_{val} = \frac{1}{2} m_{val} R^2$ – val momenti $m_{val} = 12 \text{ kg}$ massa, radius $R = 0.1 \text{ m}$ uchun hisoblanadi; ω – qurilmaning burchak tezligi; $M_{aero} = \frac{1}{2} \rho A C_m V^2$ – aerodinamik kuchlarning momenti, foydali maydon A , qarshilik koeffitsienti C_m va shamol tezligi V ga bog'liq; qarshilik momenti $M_{tr} = k_{tr} \omega$ aylanish tezligi ω ga proporsional; elektromotoring yuklanish momenti P_{el} quvvat orqali topiladi: $M_{yuk} = P_{el} / \omega$.



16-rasm. Vertikal o'qli shamol turbinasini ishga tushirish jarayonida burchak tezligining o'zgarishi. $A = 5 \text{ m}^2$, $I = 34.06 \text{ kg m}^2$, $V = 4 \text{ m/s}$, $P_{El} = 300 \text{ Vt}$

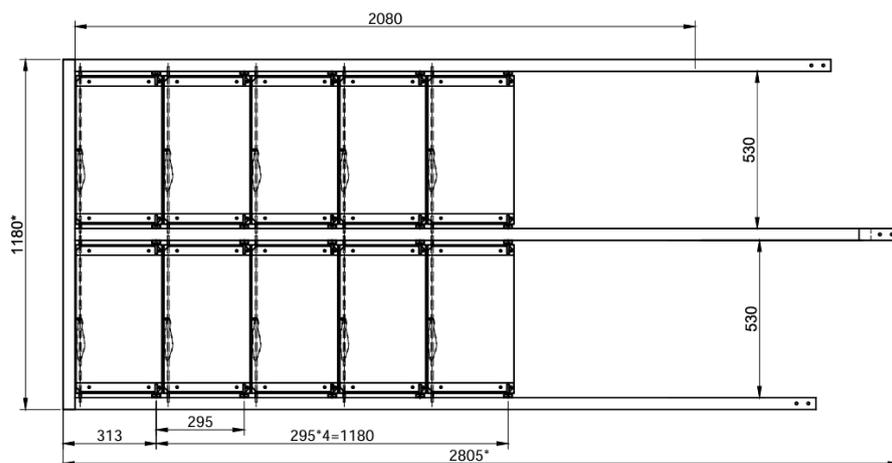


17-rasm. Vertikal o'qli shamol turbinasini ishga tushirish jarayonida burchak tezligining o'zgarishi. $A = 8 \text{ m}^2$, $I = 56.76 \text{ kg m}^2$, $V = 3 \text{ m/s}$, $P_{El} = 300 \text{ Vt}$

(15) tenglama uchun boshlang'ich shart $\omega(0) = 1 \text{ rad/s}$ tarzida qabul qilindi. Tenglamani yechish uchun o'zgarimas qadam va to'rtinchi darajali aniqlikka ega Runge-Kutta usuli qo'llanildi. Hisoblashning namunaviy natijalari 16- va 17-rasmlarda keltirilgan.

Paragrafning natijalari ushbu vertikal o'qli shamol turbinasining foydali ish maydonining elektr energiyasini ishlab chiqarishdagi rolini ko'rsatdi va elektr generatorining quvvatini tanlash imkonini berdi.

IAP 7811 asosida yaratilgan shamol uskinasi tajriba namunasi FAP 20240465 foydali model patenti arizasi asosida ishlab chiqilgan, takomillashtirilgan shamol uskinasida bartaraf etildi (§4.6). Jumladan, podshipniklar va cheklovchi qurilmani o'rnatish orqali oqim yo'nalishiga qarab ishchi qanotlar holatini qayta o'rnatishda yuzaga keladigan shovqin kamaytirildi, qanotlar aylanish o'qidan uzoqlashtirildi, bu esa shamolning foydali momentini oshirdi va parazitik vertikal oqimlarni bartaraf etdi, shuningdek, qurilmaning umumiy foydali ishchi yuzasi kengaytirildi (18-rasm).



18-rasm.
FAP 20240465
bo'yicha qurilmaning
yon tomondan
ko'rinishi

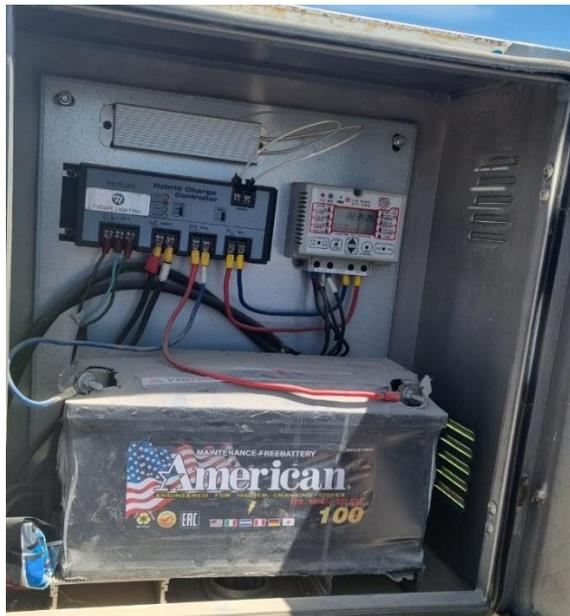
FAP 20240465 bo'yicha vertikal o'qli shamol turbinasining tajriba namunasi ishlab chiqildi va Buxoro viloyatining Olot tumanidagi Kesakli qishlog'idagi 10 sonli oilaviy poliklinika tomiga o'rnatildi.

Dissertatsiyaning so'nggi bobida "Yaratilgan vertikal o'qli shamol turbinalarini tabiiy sharoitda sinovdan o'tkazish va ularning iqtisodiy samaradorligi" muhokama qilingan. FAP 20240465 bo'yicha VEU tajriba namunasi O'zR FA MISMI da tayyorlandi, Kesakli qishlog'ida o'rnatildi (19 va 20-rasmlar).

Davlat moliyalashtirishi doirasida (IL-21071166 granti, 2022-2024 yy.) uchta vertikal o'qli shamol turbinalari namunasi tayyorlandi, ular Toshkent viloyati, Buxoro viloyati va Toshkent shahrida o'rnatildi.



19-rasm. FAP 20240465 asosidagi qurilmaning yakuniy ko'rinishi va machta



20-rasm. Vertikal o'qli shamol turbina uchun elektron qurilmalar shiti

4-jadval

Kesakli qishlog'ida o'rnatilgan VEU energik xususiyatlari

| Shamol tezligi V , m/s | Rotordagi aerodinamik quvvat P_a , Vt | VEU-2 elektr quvvati P_E , Vt |
|-------------------------------|--|--------------------------------------|
| 2 | 53 | 31,58 |
| 2,5 | 107,2 | 63,9 |
| 3 | 235,6 | 140,4 |
| 3,5 | 298,1 | 177,7 |
| 4 | 634,8 | 378,3 |
| 4,5 | 821,6 | 489,7 |
| 5 | 1148,9 | 684,8 |
| 5,5 | 1316,3 | 784,5 |
| 6 | 1985,4 | 1183,3 |
| 6,5 | 2103,1 | 1253,5 |
| 7 | 2615,7 | 1558,9 |
| 7,5 | 2872,9 | 1712,3 |
| 8 | 3554,4 | 2118,4 |
| 8,5 | 3874,2 | 2309 |
| 9 | 4636,1 | 2763,1 |
| 9,5 | 5283,2 | 3148,8 |
| 10 | 5868,3 | 3497,5 |

§5.1 da Buxoro viloyatida o'rnatilgan FAP 20240465 ariza asosida yaratilgan uskunaning ishchi versiyasi muhokama etilgan.

4-jadvalda shamol tezligiga qarab shamol turbinasining aerodinamik va elektr quvvatiga doir tajriba natijalari keltirilgan. §5.2 da Toshkent viloyati Parkent tumani Changi qishlog'iga o'rnatilgan IAP 7811 ga muvofiq qurilgan shamol turbinasining konstruktiv ko'rsatkichlari keltirilgan (21 va 22-rasmlar).



21-rasm. IAP 7811 asosida qurilmaning ko'rinishi. Chap tomonda Xitoyda ishlab chiqarilgan shamol turbinasi joylashgan



22- rasm. Changi qishlog'ida o'rnatilgan shamol turbinasining elektr paneli

Ushbu shamol turbinasi namunasining sinov natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval

Toshkent viloyati Parkent tumani Changi qishlog'ida o'rnatilgan shamol turbinasining energiya xususiyatlari

| Shamol tezligi V , m/s | Rotordagi aerodinamik quvvat P_a , Vt | VEU-2 elektr quvvati P_E , Vt |
|-----------------------------|---|------------------------------------|
| 2 | 54,3 | 32,4 |
| 2,5 | 110,7 | 66 |
| 3 | 193,6 | 115,4 |
| 3,5 | 292,3 | 174,2 |
| 4 | 455,4 | 271,4 |
| 4,5 | 652,8 | 389 |
| 5 | 891,5 | 531,3 |
| 5,5 | 1180,7 | 703,7 |
| 6 | 1527,1 | 910 |
| 6,5 | 1947,3 | 1160,6 |
| 7 | 2419,4 | 1441,9 |
| 7,5 | 3002 | 1789,2 |
| 8 | 3639,9 | 2169,4 |
| 8,5 | 4283,9 | 2553,2 |

§5.3 da ishlab chiqilgan vertical o'qli shamol turbinalar texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarning qiyosiy tahlili amalga oshirildi. Yillik o'rtacha shamol tezligi 3

dan 5 m / s gacha bo'lgan hududlarda katta ishchi yuzali qurilmalarni o'rnatish tavsiya etiladi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, bunday sharoitda radiusi $R=3,5$ metr bo'lgan qurilma radiusi $R=2,5$ metr bo'lgan qurilmaga qaraganda 2,5-3 marta, radiusi $R=3$ metrga qaraganda 1,5-2 marta ko'proq energiya ishlab chiqarishi mumkin. Bunday hududlarda qurilma ishchi yuzasini oshirish uning energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirishini tasdiqlaydi.

§5.4 da shamol turbinalarini joriy etishning iqtisodiy ko'rsatkichlarini baholash amalga oshirildi. FAP 20240465 asosidagi uzunligi 3,5 m bo'lgan shamol turbinasining texnik-iqtisodiy samaradorligi shuni ko'rsatdiki, 315 kun 8 soatdan ishlaganda 5040 kVt*soat elektr energiyasi ishlab chiqaradi. Shamol turbina tannarxi 29400000 so'm bo'lgan holda uning o'zini oqlash muddati 3,9 yilni tashkil etadi. Shamol turbinasining boshqa ikkita varianti uchun o'zini oqlash muddati 5 yildan oshmaydi.

XULOSA

“Aerodinamik tadqiqotlar asosida vertikal o'qli shamol generatorini ishlab chiqish va uning optimal parametrlarini aniqlash” mavzusidagi dissertatsiya tadqiqoti natijalari asosida quyidagi asosiy xulosalar shakllantirildi.

Shamol energiyasidan ishlab chiqarish ehtiyojlari uchun foydalanishga oid ilmiy tadqiqotlar tahlil qilindi. Shamolning asosiy xarakteristikalari, vertikal va gorizontal aylanish o'qli shamol generatorlarining konstruktsiyalari o'rganildi. Jahon va O'zbekistonda shamol energiyasidan foydalanish ko'rsatkichlari hamda shamol turbinalarining aerodinamikasiga oid ishlar tahlili etildi. Ular asosida dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari shakllantirildi.

COMSOL Multiphysics va $k-\varepsilon$ turbulentslik modelidan foydalanib yupqa yassi to'g'ri to'rtburchak plastinani kichik ataka burchaklarida bir jinsli turbulent oqim bilan oqib o'tilishi tadqiq etildi. Bo'ylama va ko'ndalang tezliklar, tezlik vektori moduli, ko'tarish kuchi koeffitsienti, sirt ishqalanishi va bosimi koeffitsientlari, shuningdek turbulentslikning kinetik energiyasi va dissipatsiyasining xususiyatlari ataka burchagining 0 dan 20 gradusgacha oshishi sharoitida aniqlandi.

$k-\varepsilon$ turbulentslik modelini qo'llab, bir jinsli turbulent oqim bilan NASA 0012 aerodinamik profili oqib o'tilishi o'rganildi. Tezlik maydoni, sirt bosimi va ko'tarilish kuchi koeffitsientlari 0 dan 15 gradusgacha bo'lgan ataka burchagi uchun natijalar muhokama qilindi. Hisoblash natijalari va tajriba ma'lumotlari mosligi shamol turbinalarining aerodinamikasini modellashtirish uchun $k-\varepsilon$ turbulentslik modelidan foydalanishning maqsadga muvofiqligini isbotladi.

Turbulentslikning standart $k-\varepsilon$ va SST modellari asosida, ataka burchagining turli qiymatlarida to'rt qanotli shamol turbina atrofida uch o'lchamli oqim o'rganildi. Nyuton usulidan foydalangan holda COMSOL Multiphysics muhitida olingan natijalar SST turbulentslik modeli shamol turbinasining ishchi yuzasi bosim koeffitsientining qiymatlarini ishonchliroq tavsiflashini ko'rsatdi.

IAP 7811 patenti asosida mexanik aylanish energiyasini elektr generatoriga uzatish uchun mos yuritma, shamol yo'nalishiga sozlanuvchi to'rtburchak ishchi sirtlari bo'lgan to'rt prolyotli shamol moslamasi ishlab chiqildi. Sun'iy havo oqimi

sharoitida shamol uskunasining aerodinamik va dinamik ko'rsatkichlarini o'rganish uchun zamonaviy jihozlangan stand qurildi.

Suniy shamolning tezligi va elektr generatori faoliyati imitatsiyasidan bog'liq ravishda shamol qurilmasining aylanish tezligi va momentining stand tadqiqotlari o'tkazildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, an'anaviy shamol generatorlari 9 m/s dan yuqori tezlikdagi shamol sharoitida ishlasa, to'rt prolyotli qurilmaning tajriba namunasi 2 m/s tezlikdagi shamoldan boshlab elektr energiyasi ishlab chiqishi mumkin.

Shamol tezligi, shamol generatorining ishchi maydoni va ishlab chiqilayotgan elektr energiyasi quvvatining turli qiymatlari uchun MATLAB muhitida shamol generatorining tajriba namunasini ishga tushishi jarayoni modellashtirildi. Modellashtirish natijalari reduktor, elektr generatorining quvvati va turini tanlash uchun foydalanildi.

Turbulentlikning standart $k-\varepsilon$ va SST modellaridan foydalangan holda aylanuvchi shamol generatorining tajriba namunasi bir jinsli turbulent havo oqimi bilan o'qib o'tilishini sonli modellashtirish amalga oshirildi. Natijalar burilishning har 15° idan keyin olindi va shamol generatori loyihasini optimallashtirishda foydalanildi.

IAP 7811 asosidagi vertikal o'qli shamol turbinasi tajriba namunasi Toshkent viloyatining Parkent tumanidagi Changi qishlog'iga o'rnatildi. Qurilma binoning tarmoqdan olinadigan yillik elektr energiya sarflashini 10-15% ga kamaytirish imkonini berdi.

Nazariy va tajriba tadqiqotlari natijasida IAP 7811 asosida yaratilgan namunaviy shamol generatori takomillashtirildi hamda FAP 20240465 raqamli ariza asosida yangi qurilma sifatida rasmiylashtirildi. Xususan, aylanish o'qi yaqinidagi ishchi yuzalari olib tashlandi va harakatlanuvchi ish yuzalaridagi klapanlar shtirlarga almashtirildi.

FAP 20240465 bo'yicha shamol energetik uskunasining tajriba namunasi Buxoro viloyatining Olot tumanidagi Kesakli qishlog'iga o'rnatildi. Oilaviy poliklinika tomiga o'rnatilgan ushbu qurilma yillik elektr energiya iste'molini 9-15% ga qisqartirish imkonini berdi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

ХАМДАМОВ МУЗАФФАР МУХИДДИНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВЕТРОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ
НА ОСНОВЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
(DSc) ТЕХНИЧЕСКИМ НАУК**

Ташкент – 2025

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номерам B2024.2.DSc/T772.

Диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tiame.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Хужаев Исматулла Кушаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Наврұзов Куралбай
Доктор физико-математических наук, профессор

Халиков Салихджан Субханович
доктор технических наук, доцент

Нормуродов Чори Бегалиевич
Доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «27» августа 2025 г. в 14:00 часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40, зал заседаний-428. Тел.(99871) 262-71-52; факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмостойкости сооружений (зарегистрирована за № 32). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.(99871) 262-71-52).

Автореферат диссертации разослан «15» августа 2025 года.
(реестр Протокола рассылки № 32 от «14» августа 2025 года.)

М.М.Мирсаидов
Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

Ф.Ф.Адилов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD, с.н.с.

З.М.Маликов
Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в связи с растущим спросом на электроэнергию расширяется использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В 2024 году возобновляемые источники энергии составляли 33,5% выработанной в мире электроэнергии, из них 8,6 % соответствует ветряным электростанциям. Особое внимание обращено обеспечению автономных потребителей малой мощности, расположенных вдали от централизованного электроснабжения, в первую очередь зависит от использования источников энергии ветра. В настоящее время в развитых странах существенное значение приобретает увеличение доли возобновляемых источников энергии. Согласно Концепции развития ветроэнергетики Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), к 2050 году ветроэнергетика будет обеспечивать 35% потребности в энергии в мире. Агентство сообщает, что общая установленная мощность ВИЭ достигла нового рекорда в 3870 гигаватт в 2023 году. 86% новых энергетических мощностей, введенных в эксплуатацию в 2024 году, принадлежали ВИЭ. В этом направлении, в частности, следует обратить особое внимание на разработку ветрогенераторов с вертикальной осью вращения, работающих при малых скоростях ветра, и увеличение их производительности.

В мире ведутся научные исследования, направленные на разработку ветровых энергетических установок с вертикальной осью вращения, работающих при низких скоростях ветра, обоснование их энергетических, аэродинамических и конструктивных параметров. В данном направлении, в частности, уделяется большое внимание разработке ветроэнергетических установок с вертикальной осью, адаптированных к климатическим условиям регионов с низкой скоростью ветра, повышению их эффективности. улучшению конструктивных и эксплуатационных параметров, повышение эффективности и усовершенствованию их. Исследование аэродинамику действующих ветряных турбин, научное прогнозирование их сопротивления, вырабатываемых ими момента и электрической мощности при различных скоростях ветра являются актуальными задачами.

В последние годы в нашей республике ведутся многочисленные научные исследования, направленные на повышение эффективности использования источников энергии в промышленной и бытовой сферах, внедрение экономически эффективных технологий, а также развитие возобновляемых источников энергии. В этом направлении системно проводятся работы по расширению возможностей использования энергии ветра, включая оценку технического и валового потенциала ветроэнергии регионов и соответствующую разработку ветроэнергетических установок. В Стратегии развития «Нового Узбекистана» на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи по «обеспечению бесперебойного снабжения экономики электроэнергией, активному внедрению технологий “зелёной экономики” во

все сферы, повышению энергоэффективности экономики на 20 %»¹, а в Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 года № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году» предусмотрен «ввод в эксплуатацию в 2023 году крупных солнечных и ветровых электростанций с общей мощностью 2100 МВт». Выполнение данных задач требует, с учётом климатических условий региона и потенциала ветроэнергии, создания ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения и разработки её научно-технических решений, что имеет важное значение.

Данное диссертационное исследование в определённой степени способствует реализации задач, предусмотренных Законом Республики Узбекистан от 21 мая 2019 года № ЗРУз-539 «О использовании возобновляемых источников энергии», Указом Президента Республики Узбекистан от 9 сентября 2022 года № УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии», Постановлениями Президента Республики Узбекистан от 28 апреля 2018 года № ПП-3687 «О дополнительных мерах по реализации инвестиционных проектов в сфере возобновляемых источников энергии», от 22 августа 2019 года № ПП-4422 «О неотложных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», а также другими нормативно-правовыми документами, относящимися к данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации².

Исследования по ветроэнергетики ведутся во многих научных центрах и университетах мира, как University of California, Berkeley, University of Cambridge, Institute of Thermodynamics and Mechanics (TU Darmstadt), Germany, Institute of Fluid and Gas Dynamics (TU Dresden), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich), National Aeronautics and Space Administration (NASA), University of Massachusetts, Penn State University, Oregon state university, University of Florida, Tsinghua University (Китай) и в т.ч. научных учреждениях Российской Федерации: Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Московский авиационный

¹Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УФ-60 утвердил "Стратегию развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы".

² Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации осуществлен по материалам: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>; Journal of Approximation Theory, Applied Mathematics and Computation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; Journal of Computational and Applied Mathematics <http://www.journals.elsevier.com/mathematics>; Publish in Scientific Reports; Calcolo, Numerical Algorithms, BIT Numerical Mathematics, Журнал вычислительной математики и математической физики, <http://www.springer.com/mathematics>, также других источников.

институт (МАИ), Санкт-Петербургский Государственный университет (СПбГУ), Томский Государственный университет (ТГУ), Московский Государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА), Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Эти исследования направлены на улучшение понимания аэродинамики ветряных турбин, оптимизацию их работы и повышение эффективности генерации энергии.

Проводятся научные исследования по моделированию турбулентных потоков, обтекающих ветряные турбины, с использованием моделей турбулентности для создания новых вариантов ветряных турбин, что имеет большое значение в определении аэродинамики ветровых турбин. Сегодня такие модели, как SST (перенос сдвигового напряжения) и LES (моделирование крупных вихрей), широко используются для более глубокого анализа обтекания лопастей ветряных турбин.

Разрабатываются формы лопасти, которые эффективно работают даже при низкой скорости ветра. Исследования показали, что изменяя угол наклона лопасти и оптимизируя соотношение длины и диаметра ее, комбинируя различные типы турбин, например, турбины Савониуса и турбины Дарье, можно добиться высокой эффективности даже при различных скоростях ветра (NASA, МГТУ ГА и др.).

Активно ведутся работы по численному и натурному моделированию потока воздуха вокруг ветряных турбин и улучшением их конструктивных характеристик (МАИ, СПбГУ, UC Berkeley, ТУ Дармштадт, ТУ Дрезден, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха – ETH Zurich, NREL – National Renewable Energy Laboratory, США, DTU Wind Energy – Technical University of Denmark).

Ведутся работы по повышению устойчивости и эффективности ВЭУ (Siemens, Vestas, GE Renewable Energy), улучшению силовых характеристик лопастей и снижению шума (NREL, DTU Wind Energy). Основное внимание исследователей направлено на разработку ВЭУ большей мощности.

Степень изученности проблемы. Ветроэнергетика, как отрасль, обязана своим развитием вкладу множества ученых и инженеров со всего мира. В России одним из пионеров в этой области был Н.Е.Жуковский, который в начале XX века в ЦАГИ организовал процесс разработки первых ветроэлектрических станций и ветряков для нужд сельского хозяйства. Большой вклад в создание теоретических основ ветроэнергетики, наряду с Н.Е.Жуковским, внесли советские ученые и инженеры Н.В.Красовский, Г.Х.Сабинин, Е.М.Фатеев, Р.В.Секторов, Н.В.Вашкевич, В.В.Сидоров и другие.

Шотландский физик Джеймс Блайт в 1887 году создал первый практический ветряной электрогенератор. На международной арене вклад в развитие ветроэнергетики внесли такие ученые, как датский инженер Пауль ла Кур, который в начале XX века проводил исследования по использованию

энергии ветра для выработки электричества, и американский инженер Чарльз Ф.Браш, построивший одну из первых автоматических ветряных электростанций в 1888 году.

Немецкий физик Альберт Бетц разработал основного принципа теории ветряных турбин, доказав, что максимально 59,3% энергии ветра может быть преобразовано в электрическую энергию. Немецкий инженер Ульрих Хюттер спроектировал легкие и эффективные ветряные турбины, заложив основу для современных высокоэффективных конструкций. Хенрик Стиесдал в 1980-х годах занимался усовершенствованием роторов, генераторных систем и редукторов ветряных турбин. Морской инженер и исследователь в области ветроэнергетики Уильям Э.Херонемус первым в мире предложил концепцию офшорных (морских) ветряных турбин. Английский инженер Hubert Meadows внёс большой вклад в разработку теории роторных машин, исследовав эффективность ветряных турбин с различными профилями лопастей. Edwin Gray занимался экспериментальными исследованиями аэродинамики турбин в 1950–1970-х годах.

Основы теории электрогенераторов, применяемых в автономных возобновляемых энергетических установках малой мощности, были разработаны и усовершенствованы рядом выдающихся ученых, среди которых М.А. Григорьев, В.И. Загрядцкий, С.А. Харитонов, Б.С. Зечихин, М.В. Пронин, С.Г. Обухов, Е.И. Забудский, И.П. Копылов, П.Ю. Грачев, И.М. Кирпичникова, М.Л. Костырев, В.Г. Николаев, Е.В. Соломин, В.И. Буяльский, И.Е. Тамм, М.М. Jovanović, K. Yamazaki, Sul Ademi, Henk Polinder, Alejandro Rolán и другие.

Джейсон Джонкман (NREL) разработал программные модели FAST и OpenFAST, которые используются для оптимизации работы турбин. Он также исследовал динамические нагрузки, что помогло повысить долговечность ветряных турбин. Пол Вирс (Sandia National Laboratories, США) проводил исследования по структурной оптимизации и улучшению материалов для ветряных турбин.

Чжэнхуа Цзян занимался оптимизацией электрических систем управления и разработкой алгоритмов, обеспечивающих стабильное производство электроэнергии. Майкл Мускулус (Норвежский университет науки и технологий, NTNU) изучал форму лопастей ветряных турбин и их аэродинамические свойства. Он проводил глубокий анализ воздушных потоков и разрабатывал методы для повышения эффективности генерации энергии.

Широкомасштабные исследования по альтернативным и традиционным источникам электроэнергии ведутся в Республике Узбекистан такими ведущими учеными, как К.Р.Аллаев, Р.А.Захидов, У.А.Таджиев, О.З.Тоиров, С.С.Халиков, Н.Н.Садуллаев, А.Б.Сафаров, К.Т.Алимходжаев, Ш.К.Алимходжаев, Т.Носиров, А.Васиков, Ш.Н.Нематов, Д.М.Пулатова, У.Г.Дехконов. Вопросам аэро-и гидродинамики потоков, фигурирующих в энергетических системах, занимались и занимаются отечественные ученые Х.А.Рахматулин, Дж.Ф.Файзуллаев, К.Ш.Латипов, Р.Садуллаев,

А.А.Хамидов, И.К.Хужаев, Б.Х.Хужаёров, К.Наврузов, Н.Равшанов, З.М.Маликов, О.М.Арифжанов, А.М.Фатхуллаев и другие.

Однако научные исследования, посвященные вертикально-осевым ветроэнергетическим устройствам, способные повысить эффективность использования низкопотенциальных ветровых ресурсов, недостаточны. Поэтому необходимо продолжать научные исследования по созданию новых типов ветровых турбин и по их усовершенствованию.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Института механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз по гранту ИЛ-21071166 «Разработка ветряной турбины с вертикальной осью, функционирующей при малых скоростях ветра» (2022-2024 гг.).

Целью исследования является разработка ветрогенератора с вертикальной осью вращения, оснащенного радиальными каркасами и плоскими лопастями со стопперами, способного эффективно работать при низких скоростях ветра, а также его оптимизация путем проведения теоретических и экспериментальных испытаний.

Задачи исследования:

изучение научных работ, посвящённых разработке ветроустановок с вертикальной осью вращения и повышению их эффективности при слабых ветровых потоках;

создание ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения и подвижными рабочими элементами, обеспечивающей эффективное функционирование при низких скоростях ветра;

теоретическое исследование запуска ветровой энергетической установки (ВЭУ) при различных скоростях ветра, площади рабочей поверхности, момента инерции и мощности вырабатываемой электроэнергии;

провести стендовое и натурное исследования предлагаемых конструкций ВЭУ;

оптимизация размеров лопастей и конструкции ВЭУ на основе изучения ее аэродинамики;

определение технико-экономических показателей вертикально-осевой ВЭУ и оценка экономической эффективности ее внедрения.

Объектом исследования является ветряная турбина, которая использует энергию ветра для производства электроэнергии.

Предметом исследования являются аэродинамика ВЭУ, производимых им момент вращения и мощность электроэнергии в зависимости от условий эксплуатации и конструкции.

Методы исследования. В ходе исследования использовались методы математического моделирования и вычислительной гидродинамики, а также экспериментальные методы аэродинамики и физики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

с использованием современной модели турбулентности проанализированы аэродинамические характеристики профилей при

различных углах атаки, определены поле скоростей потока, распределение давления и коэффициент подъёмной силы и установлен оптимальный угол атаки ($\alpha=8^\circ$), при котором обеспечивается наибольшая подъёмная сила и достигается максимальная эффективность;

движение ветроэнергетической установки с вертикальной осью было смоделировано на основе стандартной $k-\epsilon$ и SST моделей турбулентности, по результатам анализа распределения давления, скорости, а также подъёмной и лобовой сил при различных углах атаки определены оптимальные параметры установки и разработана её конструкция;

впервые разработана ветроэнергетическая установка с вертикальной осью, изготовленная на основе местного сырья и материалов, имеющая конструктивно новое решение: лопасти закреплены к раме через подшипники и способны автоматически открываться и закрываться в зависимости от направления и интенсивности ветрового потока (FAP 20241465, IAP 7811);

с учётом изменения скорости ветрового потока, диаметра турбины, количества, аэродинамической длины и высоты лопастей, угла отклонения лопастей относительно направлении ветра, а также сил, действующих на лопасти, разработана математическая модель, позволяющая на основе уравнений баланса определить коэффициент использования энергии ветра ветроэнергетической установкой;

процесс пуска ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения численно смоделирован с учетом скорости ветрового потока, площади рабочей поверхности и вырабатываемой электрической мощности и определены пусковой момент турбины, минимальная рабочая скорость и условия эффективного производства энергии, в соответствии которым разработаны рекомендации по выбору редуктора и электрогенератора;

подтверждено, что за счёт оптимизации размеров ветроэнергетической установки с вертикальной осью достигнута: выработка электрическую энергию при малых (3–4 м/с) скоростях ветра, преимущества по материалоемкости, уровню шума и крутящему моменту, а эффективность в среднем на 3–10 % выше по сравнению с традиционными установками.

Практические результаты работы:

с использованием местного сырья разработана эффективная ветроэнергетическая установка малой мощности, предназначенная для потребителей из отдалённых районов, не подключённых к централизованной электрической сети;

с помощью вновь разработанного программного обеспечения определены оптимальные конструктивные параметры и создана ветротурбина, эффективная даже при низких скоростях ветра.

Достоверность полученных результатов доказана тем, что теоретические и стендовые исследования по аэродинамике ВЭУ проведены на высоком уровне с применением современных моделей турбулентности, CFD и измерительной техники, результаты которых хорошо согласуются с результатами натурных испытаний.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в исследовании аэродинамических и энергетических характеристик нового типа ВЭУ с подвижными рабочими лопастями, функционирующих при малых скоростях ветра.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработана методика лабораторного и натурального исследования ветрового устройства с вертикальной осью вращения, которая позволила разработать более совершенную конструкцию устройства.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных в процессе повышения эффективности и внедрения вертикальной ветроэнергетической установки:

получен патент Агентства интеллектуальной собственности Министерства юстиции Республики Узбекистан (№ FAP 20240465, IAP 7811) на ветроэнергетическую установку с вертикальной осью, адаптированную для эффективной работы при низких скоростях ветра. В результате создана возможность повышения коэффициента использования энергии ветра C_p установки на 3...10 %;

конструкция ветроэнергетической установки с вертикальной осью, работающей при низки скорости ветровых потоков, усовершенствована и внедрена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений в Мирзо-Улугбекском районе города Ташкента (справка АО «Национальные электрические сети Узбекистана» № 01-04-36/1342 от 18 марта 2024 года). В результате обеспечена возможность выработки электрической энергии при скорости ветра в диапазоне 3–10 м/с, снижены материалоемкость и уровень шума установки, достигнута непрерывность энергоснабжения потребителя;

разработанная ветроэнергетическая установка с вертикальной осью была внедрена в кургане Куёш Паркентского района Ташкентской области (справка Института материаловедения Академии наук Республики Узбекистан № 01-186 от 20 октября 2024 года). В результате потребление сетевой электрической энергии снизилось на 5–10 %;

разработанная ветроэнергетическая установка с вертикальной осью была внедрена в семейную поликлинику № 10 Олотского района Бухарской области (справка хокимията Олотского района № 04-6286 от 18 октября 2023 года). В результате поликлиника была обеспечена бесперебойным электроснабжением, а потребление сетевой электрической энергии снизилось на 5–9 %.

Апробация результатов исследований. Результаты исследования обсуждались, в том числе на 8 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме исследования опубликовано 36 публикаций, в т.ч. 2 монографии, 15 статей – 8 в зарубежных и 7 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Подана заявка на

патент на полезную модель и зарегистрированы 3 программных продуктов ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 196 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, обоснована достоверность полученных результатов, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

В первой главе диссертации представлен **«Анализ состояния научных исследований и технических разработок по использованию энергии ветра»**.

В §1.1 представлены понятия основных характеристик ветров, в том числе полярных течений и местных ветров.

В §1.2 анализирована общая структура вертикальных и горизонтальных ветровых турбин. Представлен анализ типов ветрогенераторов. Приведена информация о составных частях ветрогенератора, которые необходимы для выработки электрической энергии, а также перечислены их функции.

В §1.3 обсуждена мировая практика использования энергии ветра. Представлен ретроспективный и перспективный анализ мировых темпов выработки электроэнергии с использованием ветрогенераторов.

В §1.4 представлен состав возобновляемых источников энергии и этапов их развития в Узбекистане. Обсуждено развитие использования ветроэнергии в Республике Узбекистан. Приведена информация о международных соглашениях по производству электроэнергии с использованием энергии ветра в регионах, в которых они могут быть установлены. Отмечено, что в настоящее время бурно развиваются крупные и малые ветровые турбины, которые внесут значительный вклад в улучшение энергетическую отрасль экономики.

В §1.5 дается анализ работ по аэродинамике ветровых турбин.

Проведенный анализ состояния вопросов по исследованию и разработке ветровых энергетических устройств позволили сформулировать цель и задачи данной диссертационной работы.

Вторая глава работы называется **«Моделирование обтекания тонкого плоского прямоугольника турбулентным потоком с привлечением $k-\varepsilon$ модели турбулентности и среды Comsol Multiphysics»**. В этой главе представлены некоторые результаты расчета обтекания прямоугольного аэродинамического профиля с использованием стандартных решателей

Comsol Multiphysics в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Обтекание прямоугольного профиля изучалось при числах Рейнольдса $10\,000 < Re < 2\,000\,000$ и угле атаки $\alpha = 0^\circ - 20^\circ$. Получены результаты по скорости, давлению и другим параметрам для разных значений угла атаки. Реализация программного комплекса Comsol Multiphysics показала хорошую сходимость, стабильность и высокую точность модели. Адекватность использованного математического аппарата доказана расчетами обтекания профиля NASA 0012 при тех же условиях, которые учтены при обтекании прямоугольника.

В §2.1 исследовалась задача обтекания однородным турбулентным потоком тонкой плоской прямоугольной пластины при малых углах атаки. Геометрия двумерной области расчета отражена на рис. 1.

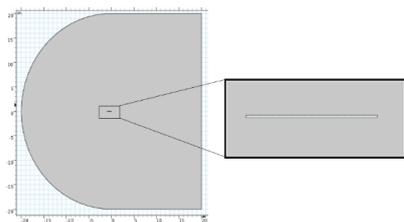


Рис. 1. Геометрия области течения обтекании пластины

Полагается, что пластина имеет стационарное неподвижное положение. Входная граница в виде полуокружности принята как граница невозмущенного потока при допустимых значениях угла атаки потоком пластины.

Центр полуокружности с радиусом 20 м расположен в точке $(0.5; 0)$ – в передней кромки пластины.

Граничные условия на полуокружности и на границах $y = \pm 20$ м (на границе G_1) задаются в зависимости от угла атаки

$$U(x_{G_1}, y_{G_1}) = u_0 \cos \alpha, V(x_{G_1}, y_{G_1}) = u_0 \sin \alpha, \\ k(x_{G_1}, y_{G_1}) = \frac{3}{2} (u_0 l_T)^2, \varepsilon(x_{G_1}, y_{G_1}) = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad (1)$$

где u_0 – модуль скорости набегающего по основному направлению потока; α – угол между направлением потока и оси координат Ox .

На этой границе значение избыточного давления равно нулю:

$$P(x_{G_1}, y_{G_1}) = 0 \text{ (Па)}.$$

Пластина в расчетной области представлена толщиной $\delta = 0.8$ мм и длиной $c = 1$ м. Соответственно, для

$$G_2 = [(x=0 \cup x=1 \cap |y| \leq 0.004)] \cup [(y = \pm 0.004 \text{ м}) \cap (0 \text{ м} \leq x \leq 1 \text{ м})]$$

задавали условия $U(x_{G_2}, y_{G_2}) = V(x_{G_2}, y_{G_2}) = 0$ м / с.

На выходе из расчетной области $y = 20$ м (G_3) для определения скоростей принимали условие гладкого сопряжения

$$\frac{\partial U(x_{G_3}, y_{G_3})}{\partial n} = 0, \frac{\partial V(x_{G_3}, y_{G_3})}{\partial n} = 0.$$

Рассматривается процесс установления потока несжимаемой жидкости. Поток описывали двумерными уравнениями Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{\partial \rho U U}{\partial x} + \frac{\partial \rho U V}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} S_{11}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} S_{12}), \\ \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial \rho U V}{\partial x} + \frac{\partial \rho V V}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} S_{12}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} S_{22}). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} S_{11} &= 2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); & S_{12} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}; \\ S_{22} &= 2 \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right); & \mu_{eff} &= \mu + \mu_t. \end{aligned}$$

В качестве модели турбулентности выбрали модифицированную $k - \varepsilon$ модель:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + U \frac{\partial \rho k}{\partial x} + V \frac{\partial \rho k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \\ + G_k + G_b - \rho \varepsilon - 2 \rho \varepsilon M_t^2 + S_k; \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \\ + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon, \end{cases} \quad (3)$$

что способствовало более адекватному описанию объекта. Здесь использованы обозначения

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}},$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \phi, \quad \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} (\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3},$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial u_i}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t \partial T}{\text{Pr}_t \partial x_i}, \quad \text{Pr}_t = 1 / a_t$$

$$a_0 = 1 / \text{Pr} = k / \mu c_p, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9,$$

$$\delta_k = 1.0, \quad \delta_\varepsilon = 1.2, \quad A_0 = 4.04.$$

В §2.2 представлен численный метод решения задачи обтекания плоской пластины. При расчетах использована сетка из 60200 элементов с локальным сгущением вблизи поверхности профиля. В качестве начального приближения использовали результаты потенциального течения.

В § 2.3 определены поля продольных и поперечных скоростей, давления, кинематической энергии турбулентности и ее диссипации и проведен анализ результатов вычислительного эксперимента.

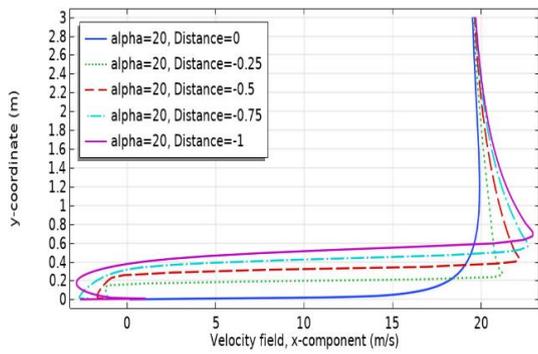


Рис. 2. Поле продольной скорости в сечениях $x/c = 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1$ при обтекании прямоугольника. $\alpha = 20^\circ$

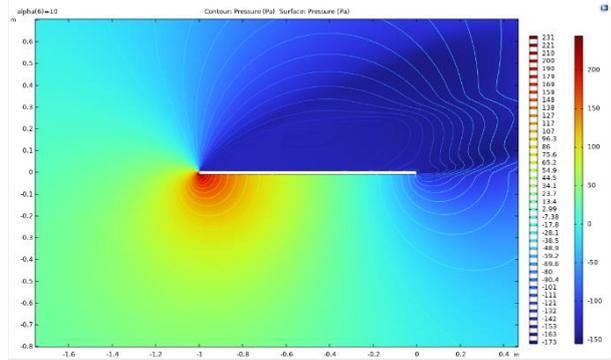


Рис. 3. Поле давления при обтекании прямоугольника. $\alpha = 10^\circ$

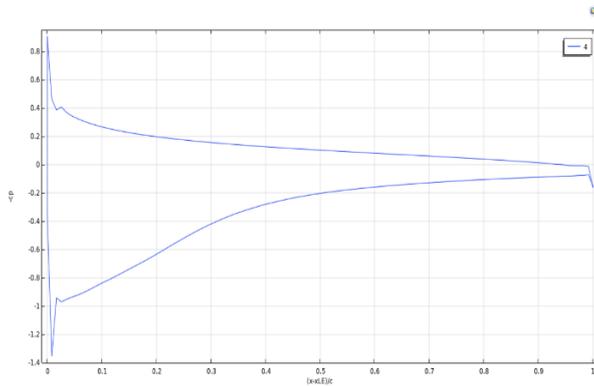


Рис. 4. Коэффициент поверхностного давления C_p на прямоугольнике при $\alpha = 4^\circ$

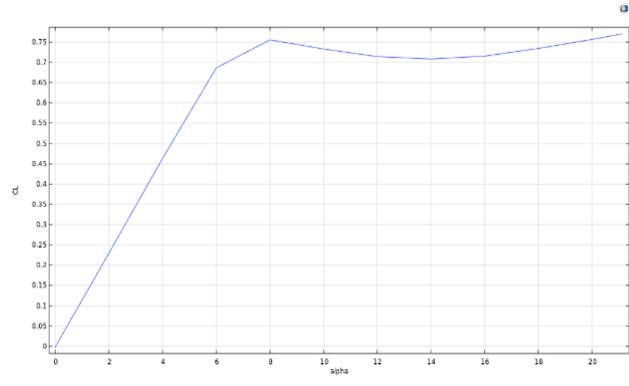


Рис. 5. Влияние угла атаки на коэффициент подъемной силы прямоугольника

Результаты расчетов показали, что с увеличением угла атаки более заметно проявляются зоны обратного течения (рис. 2), высокого и низкого давления (рис. 3). Выделены характерные особенности замкнутого контура графика коэффициента поверхностного давления $C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_0^2}$ (рис. 4).

Обнаружено не монотонное поведение коэффициента подъемной силы в рассматриваемом интервале угла атаки прямоугольника (рис. 5).

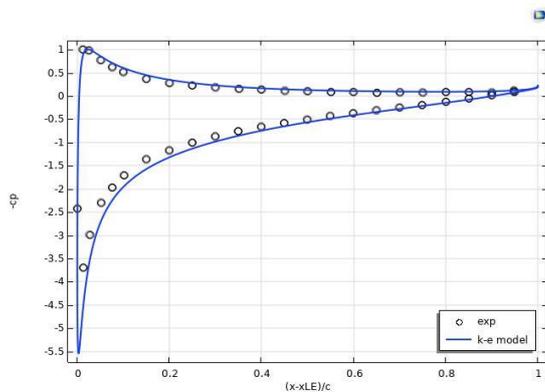


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные значения коэффициента давления на поверхности профиля NASA 0012 при угле атаки $\alpha = 10^\circ$

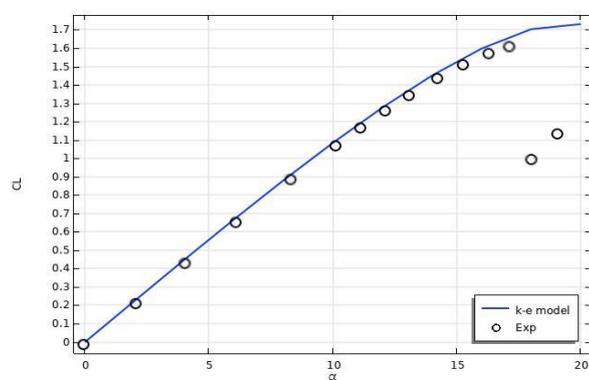


Рис. 7. Влияние угла атаки на коэффициент подъемной силы профиля NASA 0012

На примере обтекания профиля NASA 0012 однородным турбулентным потоком при малых углах атаки ($0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$) доказана применимость $k-\varepsilon$ модели турбулентности и возможностей программного комплекса Comsol Multiphysics к задачам обтекания, аналогичным приведенным в предыдущих параграфах. Расчеты проводили для скорости потока 20 м/с и длины хорды 1 м . Стабилизация вычислительного процесса обеспечена за счет использования метода наименьших квадратов Галеркина. Приведены результаты сравнения коэффициента давления (рис. 6) и коэффициента подъемной силы (рис. 7, $\alpha = 6^\circ$) с экспериментальными данными NASA.

В третьей главе "Исследование трёхмерного поля течения ветра при обтекании ветрогенератора на основе современных моделей турбулентности" диссертации представлены результаты трёхмерного численного моделирования поля течения воздуха вокруг вращающегося ветрогенератора с использованием современных моделей турбулентности. В исследовании рассматривалась ВЭУ с четырьмя пролетами и вертикальной осью вращения, которая представляет собой оптимальный вариант среди современных конструкций, обеспечивающий высокую скорость вращения лопастей, хорошую сбалансированность конструкции и плавность хода.

В §3.1 представлена трехмерная модель вращающегося ветрогенератора с вертикальной осью вращения (рис. 8). Длина лопасти ВУ составляет 3 м . Нижняя граница лопасти находится 0.5 м от земной поверхности.

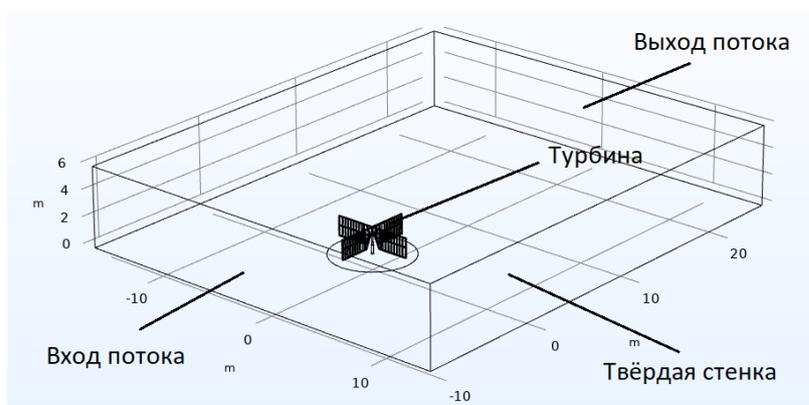


Рис. 8. Расположение ветряной турбины внутри расчетной области

При формировании и решении задачи использовали геометрию объекта по рис. 9.

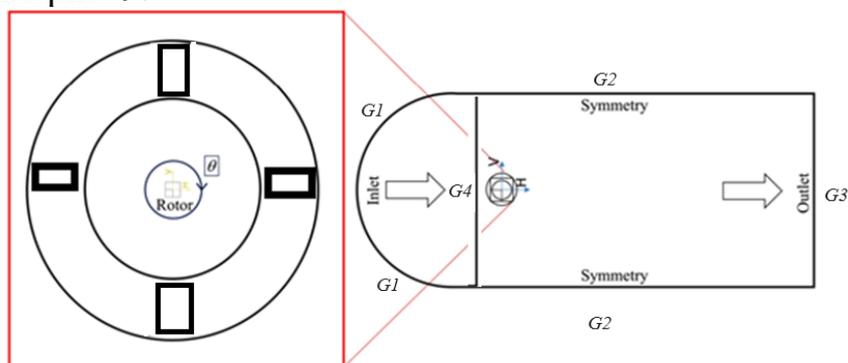


Рис. 9. Геометрия расчетной области

Для моделирования трехмерного турбулентного воздушного потока пользовались уравнением закона сохранения массы и осреднёнными

Рейнольдсом уравнениями сохранения импульса в дивергентной форме. Используются стандартная модель $k - \varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (9)$$

и переходная модель SST

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \delta_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \gamma G_k - Y_k^* + S_k, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \delta_\omega \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + G_\omega - Y_\omega^* + D_\omega + S_\omega. \quad (11)$$

Турбулентная вязкость определяется по формуле: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

Сформулированы условия однозначности решения задачи.

При $G_1 = (x^2 + y^2 = R^2 \cap x \leq 0)$ налагались входные условия:

$$U_{G_1} = u_0, V_{G_1} = 0, W_{G_1} = 0, p_{G_1} = 0, k(x_{G_1}, y_{G_1}) = \frac{3}{2} (u_0 l_T)^2, \varepsilon(x_{G_1}, y_{G_1}) = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T}.$$

На границе $G_2 = ((0 \leq x \leq L_x) \cap |y| = L_y)$ налагались условия симметрии:

$$\frac{\partial U_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial V_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial W_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon_{G_2}}{\partial y} = 0, \frac{\partial k_{G_2}}{\partial y} = 0.$$

На выходе G_3 из участка при $x = L_x$ реализовали условия гладкого сопряжения:

$$\frac{\partial U_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial V_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial W_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon_{G_3}}{\partial y} = 0, \frac{\partial k_{G_3}}{\partial y} = 0.$$

Результаты расчета аэродинамических характеристик вертикальной турбины получены методами численного моделирования гидродинамических процессов (CFD) в пакете программ Comsol Multiphysics с применением решателя с учетом вращающегося устройства, который позволяет изучать аэродинамику вращения устройства при заданном невозмущенном поле скоростей (§3.2).

Для решения уравнений турбулентной модели был выбран полностью связанный метод (Fully Coupled) с использованием алгоритма прямого решателя PARDISO (§3.3). Использовали итерационный метод Ньютона с демпфирующим коэффициентом 0.1. Процесс установления для поставленной задачи продолжался до 1000 итераций. Коэффициент допуска был равен 1, а остаточный фактор был установлен на уровне 1000. Эти параметры играют важную роль в процессе решения и позволяют достичь

необходимого баланса между точностью вычислений и вычислительной эффективностью.

Схема согласования давления и скорости была реализована аналогично методу Ньютона. Для уравнений импульса и турбулентности использована схема второго порядка точности. Сходимость отслеживалась через моменты и тягу винта с критериями 10^{-4} для уравнения неразрывности и 10^{-5} для других. В диссертационной работе представлены результаты в трех ортогональных сечениях, полученные для значений угла $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ при вращении ВЭУ.

На табл. 1 приведены наибольшие и наименьшие значения продольной и поперечной скорости в области течения при различных значениях угла атаки α .

Таблица 1
Наибольшие и наименьшие значения продольной и поперечной скоростей потока в области течения при различных значениях угла α

| Угол α , град | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
|----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| U_{\max} (м/с) | 6.1 | 6.49 | 6.38 | 5.87 | 6.4 | 6.95 |
| U_{\min} (м/с) | -0.966 | -0.605 | -1.42 | -3.25 | -5.52 | -6.66 |
| V_{\max} (м/с) | 3.59 | 2.01 | 3.13 | 3.71 | 4.65 | 4.3 |
| V_{\min} (м/с) | -4.12 | -4.06 | -4.36 | -4.99 | -4.2 | -3.96 |

В §3.4 проведено исследование аэродинамики обтекания вращающегося ветрогенератора. На рис. 10 приведены профили продольной скорости потока в сечении $x = 0$ при различных значениях угла α .

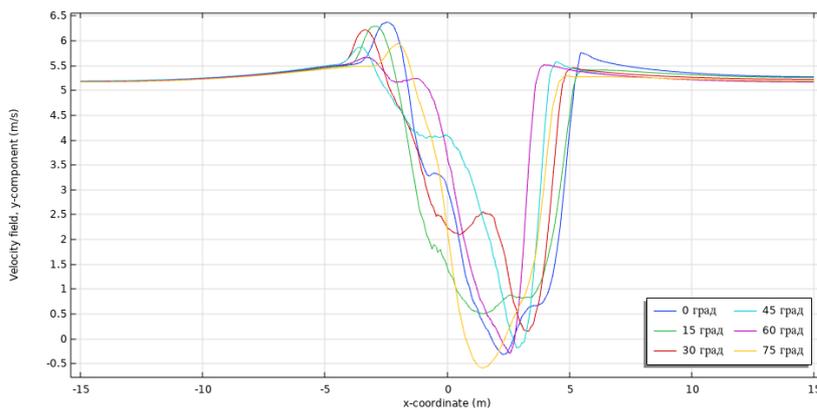


Рис. 10. Поля продольной скорости в срединном горизонтальном сечении при $x = 0$ м

Аналогично определены поля поперечных скоростей, давления, модуля трехмерной скорости, кинетической энергии турбулентности и ее диссипации. В качестве аэродинамических производных вычислены коэффициенты поверхностного давления C_p и момента $C_m = C_p \frac{g}{\omega L}$.

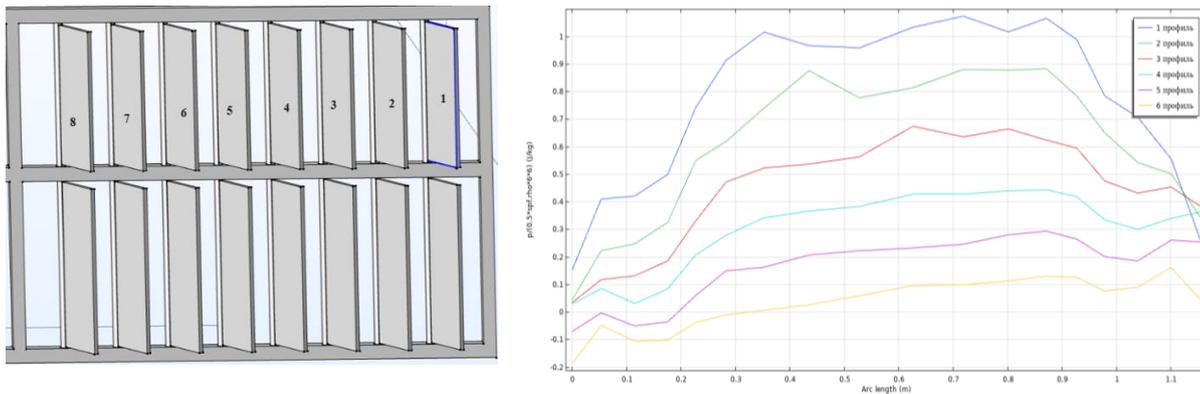


Рис. 11. Интегрированные значения C_p для отдельных лопастей верхнего ряда ВЭУ

Результаты показали, что с удалением местоположения лопасти от оси вращения увеличиваются и доля момента вращения, и доля интегрированного коэффициента поверхностного давления. Близкое расположение рабочей поверхности к оси течения приводит к нежелательным паразитным потокам в вертикальном направлении (§3.5). Эту суждения служили основанием для усовершенствования конструкции ВЭУ (см. глава IV).

Основным результатом данной главы является определение суммарной мощности ветрогенератора при $\alpha = 0^\circ$ (табл. 2).

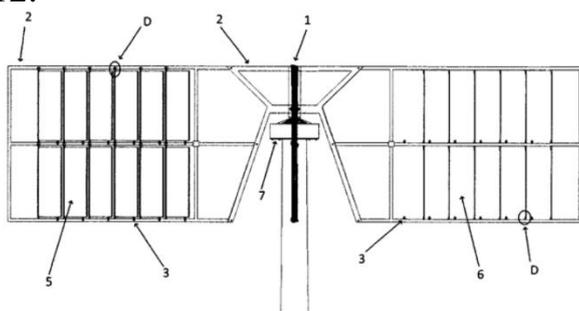
Таблица 2

Коэффициенты мощности в сравнении с экспериментальными данными при $\alpha = 0^\circ$

| Модель | C_p |
|----------------------------|-------|
| Standart $k - \varepsilon$ | 0.305 |
| Transition SST | 0.344 |
| Эксперимент | 0.352 |

Глава IV озаглавлена «**Ветровая турбина с вертикальной осью вращения (ВТВО): описание, изготовление и оптимизация экспериментального образца**».

В §4.1 приведено описание устройства с клапанами, превращающее движение ветра в электрическую энергию. Целью данной главы являются разработка, проектирование и изготовление ветроустройства, функционирующего на территориях, где годовые средние показатели ветра не высокие и в среднем составляют 3-8 м/с. Вид ветряной турбины на основе IAP 7811, разработанной в рамках проекта № IL-21071166, показан на рис. 12.



1 – центральная ось (вал); 2 – рама (каркас); 3 – эластический стопор; 4 – обратный стопор; 5 – лопасти в рабочем положении; 6 – лопасти в открытом нейтральном положении; 7 – коробка механизмов;

Рис. 12. Боковой вид устройства, изготовленного по IAP 7811

Изготовлен опытный образец ветровой турбины с вертикальной осью в механическом павильоне ИМиСС АН РУз (§4.2). Все материалы, использованные при изготовлении, имеются в наличии и являются покупными.

С целью выявления слабых сторон устройства, измерения крутящего момента и скорости вращения для подбора привода и генератора изготовлен лабораторный стенд для испытания опытного образца ВТВО (§4.3). Опыты проведены при искусственном ветре, зафиксированы значения крутящего момента, возникающий из-за разности сил сопротивления лопастей по обе стороны оси.

На рис. 13-15 приведены основные составляющие лабораторного стенда.



Рис. 13. Вентилятор, использованный для создания искусственного ветра



Рис. 14. Анемометр Vortex с указателем скорости ветра, даталоггером и программным обеспечением



Рис. 15. Демонстрационный комплект с магнитными держателями для измерения скорости и момента вращения устройства

Результаты стендового испытания ВТВО по № IAP 7811 приведены в §4.4. Определена критическая скорость ветра 1.5 м/с, при которой ветротурбина начинает совершать вращательное движение.

Таблица 3

Результаты эксперимента, полученные при $V_v=3.3$ м/с

| | | | | | | | | | | |
|---|---|------|-----|------|-----|----------|-----|------|-----|----------|
| Общий момент силы на оси вращения, Н*м | 1 | 2.4 | 4.7 | 7.3 | 10 | 18. 7 | 21 | 24 | 28 | 32. 3 |
| Величина тормозящего момента силы, Н*м | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.2 5 | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 |
| Результирующая угловая скорость оси, об/мин | 5 | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 4 |

В интервале 3.3-5.5 м/с скорости искусственного ветра и 0-0.5 Н*м величины тормозящего момента к оси ВТВО сняты показания угловой скорости и общего момента силы на оси вращения. В табл. 4 приведены результаты, полученные при постоянной скорости ветра 3.3 м/с.

В §4.5 численно изучены особенности запуска ВЭУ при заданных значениях полезной площади, скорости ветра и мощности вырабатываемой электрической энергии согласно уравнению:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{аэро} - M_{тр} - M_{нагрузки}. \quad (12)$$

Здесь общий момент инерции устройства составляет $I = 4I_{np} + I_{вал}$, где $I_{np} = \frac{1}{12} m_{np} (L^2 + W^2)$ – момент инерции одного пролета с массой $m_{np} = 17 \text{ кг}$, длиной $L = 3 \text{ м}$ и шириной $W = 1.5 \text{ м}$; $I_{вал} = \frac{1}{2} m_{вал} R^2$ – момент вала с массой $m_{вал} = 12 \text{ кг}$ и радиусом $R = 0.1 \text{ м}$; ω – угловая скорость устройства; $M_{аэро} = \frac{1}{2} \rho A C_m V^2$ – момент аэродинамических сил пролета с полезной площадью A с коэффициентом сопротивления C_m в зависимости от скорости ветра V ; момент трения пропорционален скорости вращения ω : $M_{тр} = k_{тр} \omega$; момент нагрузки электродвигателя с мощностью $P_{эл}$ составил $M_{нагрузки} = \frac{P_{эл}}{\omega}$.

Начальным условием уравнения (15) служило $\omega(0) = 1 \text{ рад/с}$. Для решения уравнения использовали равномерный шаг и метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Примерные результаты расчета приведены на рис. 16 и 17.



Рис. 16. Изменение угловой скорости ВЭУ в процессе запуска. $A = 5 \text{ м}^2$, $I = 34.06 \text{ кг м}^2$, $V = 4 \text{ м/с}$, $P_{эл} = 300 \text{ Вт}$

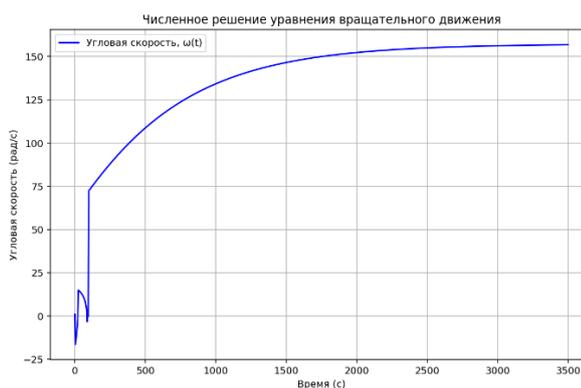


Рис. 17. Изменение угловой скорости ВЭУ в процессе запуска. $A = 8 \text{ м}^2$, $I = 56.76 \text{ кг м}^2$, $V = 3 \text{ м/с}$, $P_{эл} = 300 \text{ Вт}$

Результаты данного параграфа показали роль полезной площади в выработке электрической энергии ВЭУ и позволили выбрать мощность электрогенератора.

Недочеты опытного образца ВЭУ по IAP 7811 устранены при разработке усовершенствованной ВЭУ по заявке FAP 20240465 на полезную модель (§4.6). В частности, установкой подшипников и ограничителя уменьшен шум, возникающий при перестроении положения лопастей под направлением потока; расположения лопастей удалены от оси вращения ВЭУ, чем увеличен полезный момент ветра, и устранены паразитные вертикальные течения, а также увеличена общая полезная рабочая поверхность устройства.

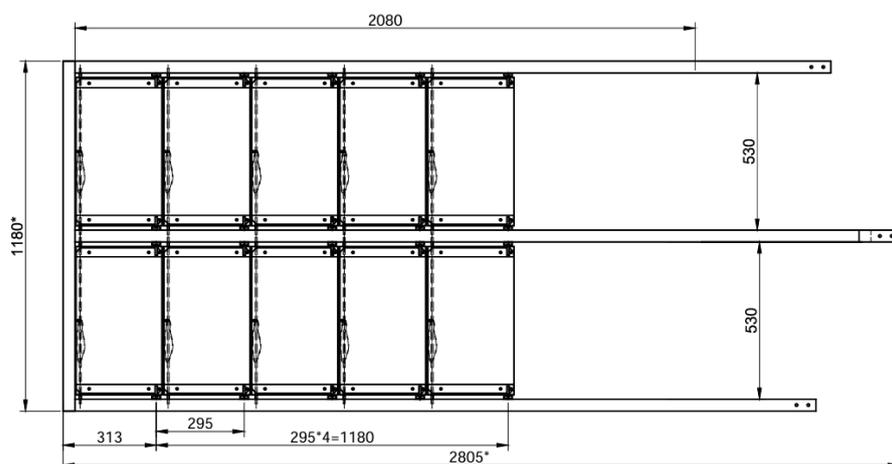


Рис. 18. Боковой вид пролета ВЭУ по FAP 20240465

Разработан опытный образец ВЭУ по FAP 20240465 (рис. 18), который был установлен на крыше здания семейной поликлиники в пос. Кесакли Алатского района Бухарской области.

В последней главе диссертации обсуждены «**Натурные испытания разработанных ветровой турбины с вертикальной осью вращения (ВТВО) и их экономическая эффективность**». Опытный образец ВЭУ-2 по FAP 20240465 был изготовлен на стенах ИМиСС АН РУз, транспортирован и установлен на пос. Кесакли (рис. 19 и 20).



Рис. 19. Окончательный вид устройства по FAP 20240465 и мачты

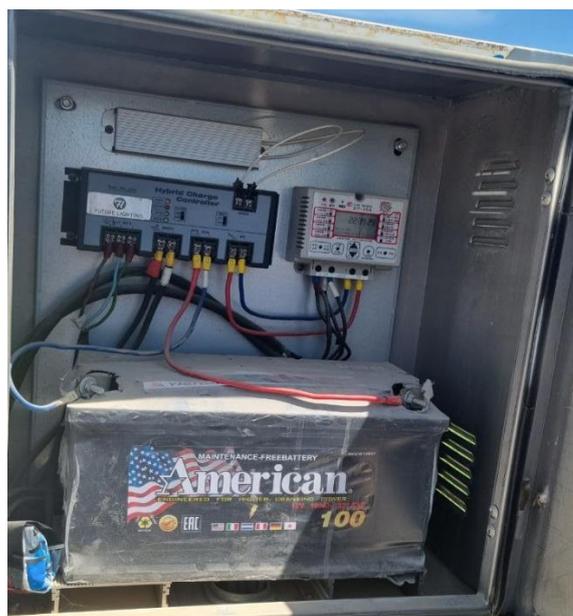


Рис. 20. Щит электроприборов к ВТВО

В рамках госфинансирования (грант IL-21071166, 2022-2024 гг.) были изготовлены три образца ВТВО, которые установлены в Ташкентской области, Бухарской области и в г. Ташкент.

В §5.1 обсужден рабочий вариант ВЭУ по FAP 20240465, который установлен в Бухарской области. В табл. 4 приведены результаты экспериментальных измерений аэродинамической и электрической мощностей данного ВЭУ в зависимости от скорости ветра.

Таблица 4

Энергетические характеристики ВЭУ, установленной в пос. Кесакли

| Скорость ветра V , м/с | Аэродинамическая мощность на роторе P_a , Вт | Электрическая мощность ВЭУ-2 P_e , Вт |
|-----------------------------|--|---|
| 2 | 53 | 31,58 |
| 2,5 | 107,2 | 63,9 |
| 3 | 235,6 | 140,4 |
| 3,5 | 298,1 | 177,7 |
| 4 | 634,8 | 378,3 |
| 4,5 | 821,6 | 489,7 |
| 5 | 1148,9 | 684,8 |
| 5,5 | 1316,3 | 784,5 |
| 6 | 1985,4 | 1183,3 |
| 6,5 | 2103,1 | 1253,5 |
| 7 | 2615,7 | 1558,9 |
| 7,5 | 2872,9 | 1712,3 |
| 8 | 3554,4 | 2118,4 |
| 8,5 | 3874,2 | 2309 |
| 9 | 4636,1 | 2763,1 |
| 9,5 | 5283,2 | 3148,8 |
| 10 | 5868,3 | 3497,5 |

В §5.2 представлены конструктивные показатели ВЭУ по IAP 7811, который установлен в пос. Чанги Паркентского района Ташкентской области (рис. 21 и 22).



Рис. 21. Вид установленного ВЭУ по IAP 7811.
Слева ВЭУ, изготовленное в КНР



Рис. 22. Щит электроприборов
ВЭУ, установленного в пос. Чанги

Результаты испытания данного варианта ВЭУ представлены на табл. 5.

Таблица 5

**Энергетические характеристики ВЭУ, установленного в пос. Чанги
Паркентского района Ташкентской области**

| Скорость ветра V , м/с | Аэродинамическая мощность на роторе P_a , Вт | Электрическая мощность ВЭУ-2 $P_э$, Вт |
|--------------------------|--|---|
| 2 | 54,3 | 32,4 |
| 2,5 | 110,7 | 66 |
| 3 | 193,6 | 115,4 |
| 3,5 | 292,3 | 174,2 |
| 4 | 455,4 | 271,4 |
| 4,5 | 652,8 | 389 |
| 5 | 891,5 | 531,3 |
| 5,5 | 1180,7 | 703,7 |
| 6 | 1527,1 | 910 |
| 6,5 | 1947,3 | 1160,6 |
| 7 | 2419,4 | 1441,9 |
| 7,5 | 3002 | 1789,2 |
| 8 | 3639,9 | 2169,4 |
| 8,5 | 4283,9 | 2553,2 |

В §5.3 проведен сравнительный анализ технических и экономических показателей разработанных вариантов ВТВО. В районах с годовой средней скоростью ветра от 3 до 5 м/с рекомендуется устанавливать устройства с большими рабочими поверхностями. Результаты показали, что в таких условиях устройство с радиусом $R = 3,5$ метра может производить в 2,5-3 раза больше энергии, чем устройство с радиусом $R = 2,5$ метра, и в 1,5-2 раза больше, чем устройство с радиусом $R = 3$ метра. Это подтверждает, что увеличение размера устройства в таких регионах значительно повышает его энергетическую эффективность.

В §5.4 произведена оценка экономических показателей от внедрения ВЭУ. Техничко-экономическая эффективность ВЭУ по FAP 20240465 с длиной пролета 3.5 м показала, что при работе 315 дней по 8 часов в день вырабатывается электрическая энергия в объеме 5040 кВт час. При себестоимости ВЭУ 29400000 сумов срок его окупаемости составляет 3.9 год. Для остальных двух вариантов ВЭУ срок окупаемости не превышает 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований по диссертации на тему «Разработка и определение оптимальных параметров ветрового генератора с вертикальной осью вращения на основе аэродинамических исследований» сформулированы следующие основные выводы.

Проанализированы научные исследования по использованию энергии ветра для производственных нужд. Изучены основные характеристики ветра

и конструкции ветрогенераторов с вертикальной и горизонтальной осями вращения. Представлен анализ показателей использования энергии ветра и работ по аэродинамике ветровых турбин в мире и в Узбекистане.

Исследовано обтекание тонкой прямоугольной плоской пластины однородным турбулентным потоком при малых углах атаки с использованием модели турбулентности $k-\varepsilon$ и COMSOL Multiphysics. Выявлены особенности продольных и поперечных скоростей, изолиний модуля вектора скорости, коэффициентов подъемной силы, поверхностного трения и давления, а также кинетической энергии турбулентности и ее диссипации при увеличении угла атаки от 0 до 20 градусов.

С применением $k-\varepsilon$ модели турбулентности исследовано обтекание аэродинамического профиля NASA 0012 однородным турбулентным потоком. Обсуждены результаты, относящиеся поле скоростей, коэффициентов поверхностного давления и подъемной силы для угла атаки потока от 0 до 15 градусов. Согласие результатов расчета с экспериментальными данными доказало целесообразность использования $k-\varepsilon$ модели турбулентности для моделирования аэродинамики ветровых установок.

На основе стандартной $k-\varepsilon$ модели и SST модели турбулентности исследовано трехмерное обтекание четырехлопастной ветровой установки под разными углами атаки. Результаты в среде COMSOL Multiphysics с привлечением метода Ньютона показали, что модель турбулентности SST более достоверно описывает значения коэффициента давления на рабочей поверхности ветрогенератора.

По патенту IAP 7811 изготовлен опытный образец четырехпролетного ветрового устройства с подвижными, подстраиваемыми под направления потока ветра, четырехугольными рабочими поверхностями и соответствующим приводом для передачи механической энергии вращения в электрогенератор. Также изготовлен стенд с современной компоновкой для изучения аэродинамики и динамических показателей ветроустройства в условиях искусственного воздушного потока.

Проведено стендовое исследование скорости и момента вращения ветроустройства в зависимости от скорости искусственного ветра и имитации работы электрогенератора. Результаты показали, что если традиционные ветрогенераторы работают при больших (>9 м/с) скоростях ветра, то опытный образец четырехпролетного устройства может выработать электроэнергию, начиная 2 м/с скорости ветра.

В среде MATLAB моделировали процесс запуска опытного образца ветрогенератора с варьированием значений скорости ветра, общей рабочей площади ветрогенератора и мощности вырабатываемой электроэнергии. Результаты моделирования использованы для выбора редуктора, мощности и типа электрогенератора.

В рамках стандартной модели $k-\varepsilon$ и модели SST турбулентности проведено численное моделирование обтекания вращающегося опытного образца ветрогенератора по IAP 7811 однородным турбулентным потоком

воздуха. Результаты получены через каждые 15° вращения устройства и использованы при оптимизации проекта ветрогенератора.

Опытный образец ВЭУ по IAP 7811 установлен в поселок Чанги Паркентского района Ташкентской области. Установленное устройство позволяет экономить 10 – 15 % годового потребления электроэнергии здания.

В результате теоретических и экспериментальных исследований опытный образец ветрогенератора, созданный на основе IAP 7811, был усовершенствован и оформлен как новое устройство в соответствии с заявкой № FAP 20240465. В частности, рабочие поверхности удалены от оси вращения и клапаны подвижных рабочих поверхностей заменены штирями.

Изготовленный опытный образец ВЭУ по заявке FAP 20240465 установлен в пос. Кесакли Алатского района Бухарской области. Устройство позволяет экономить 9–15% годового потребления электроэнергии семейной поликлиники, в которой оно установлено.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 02/30.12.2019.T/FM.61.01 AWARDED THE
SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES**

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF
STRUCTURES**

HAMDAMOV MUZAFFAR MUHIDDINOVICH

**DEVELOPMENT AND DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS
OF A VERTICAL AXIS WIND GENERATOR BASED ON
AERODYNAMIC RESEARCH**

01.02.05 – Mechanics of liquid and gas

**CONTENT OF DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR (DSc) ON
TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of doctoral (DSc) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number № B2023.4.DSc/T688.

The dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (www.instmech.uz) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address (www.ziyo.net.)

Scientific adviser: **Khujaev Ismatulla Kushaevich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Official opponents : **Navruzov Kuralbay**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Khalikov Salikhdjan Subkhanovich
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Normurodov Chori Begaliyevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Samarkand state university**

Defense will take place «27» august 2025 at 14:00 at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 40, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail:instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number №. 32). (Address: 100125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 40. Tel. (99871) 262-71-52).

Abstract of the dissertation sent out on “15” august 2025 y.
(mailing report №. 32 on “14” august 2025 y.)

M.M.Mirsaidov

Chairman of the Scientific Council for awarding scientific degrees, doctor of technic sciences, professor, academician

F.F.Adilov

Scientific secretary of Scientific Council for awarding scientific degrees, PhD, Senior Researcher

Z.M. Malikov

Chairman of the council seminar at the Scientific Council for the awarding degrees, doctor of technic sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract)

The aim of the research is the development of a vertical-axis wind turbine equipped with radial frames and flat blades with stoppers, capable of operating efficiently at low wind speeds, as well as its optimization through theoretical and experimental testing.

The object of the research work is a wind turbine that uses wind energy to produce electricity.

The scientific novelty of the work is as follows:

the aerodynamic characteristics of profiles at various angles of attack were analyzed using a modern turbulence model, determining the flow velocity, pressure distribution, and lift coefficient. It was established that the optimal angle of attack providing the highest lift is $\alpha = 8^\circ$, at which the maximum efficiency is achieved;

the operation of the vertical-axis wind turbine was modeled based on standard $k-\varepsilon$ and SST models. At different angles of attack, the analysis of pressure, velocity, lift, and drag forces allowed determining the optimal parameters of the device, and its design was developed;

for the first time, a vertical-axis wind power unit was developed using locally sourced raw materials and featuring a new structural solution. The blades are mounted on the frame via bearings and can automatically open and close depending on the wind flow direction and intensity (Patent No. FAP 20241465, IAP 7811);

a mathematical model was developed to determine the wind energy utilization coefficient of the wind power unit based on balance equations, taking into account changes in wind flow speed, turbine diameter, the number and height of blades, aerodynamic surface length, blade deviation angle relative to the circular trajectory, as well as the lift and drag forces acting on the blades;

the start-up process of the vertical-axis wind turbine was numerically simulated for various parameters, including wind flow speed and electrical power. The turbine's start-up torque, minimum operating speed, and conditions for efficient energy generation were identified, and recommendations were developed for selecting the gearbox and electric generator, as well as the rotational speed and torque, in accordance with these parameters;

it was confirmed that, due to the optimization of the aerodynamic shape and moment of inertia, the vertical-axis wind power unit can generate electricity even at wind speeds of 3–4 m/s. Moreover, it was shown to have advantages over conventional units in terms of material consumption, noise level, and torque, with an average efficiency improvement of 3–10%.

Implementation of research results. Based on scientific results obtained in the process of improving the efficiency and implementation of vertical wind power plant:

A patent was obtained from the Intellectual Property Agency of the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (No. FAP20240465, IAP 7811) for a vertical-axis wind power unit adapted for efficient operation at low wind speeds. As a result, it became possible to increase the wind energy utilization coefficient (C_p) of the device by 3–10%;

the design of the vertical-axis wind power unit operating at low wind speeds was improved and implemented at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures in the Mirzo Ulugbek district of Tashkent city (according to the reference of JSC “National Electric Grids of Uzbekistan” No. 01-04-36/1342 dated March 18, 2024). As a result, the possibility of generating electricity at wind speeds in the range of 3–10 m/s was achieved, material consumption and noise of the device were reduced, and the continuity of the power supply was ensured;

the developed vertical-axis wind power unit was implemented at the “Solar Fortress” in the Parkent district of Tashkent region (according to the reference of the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 01-186 dated October 20, 2024). As a result, grid electricity consumption was reduced by 5–10%;

the developed vertical-axis wind power unit was implemented at Family Polyclinic No. 10 in the Olot district of Bukhara region (according to the reference of the Olot district administration No. 04-6286 dated October 18, 2023). As a result, the polyclinic was provided with uninterrupted electricity supply, and grid electricity consumption was reduced by 5–9%.

Volume and structure of dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 196 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-bo'lim (I часть; I part)

1. Хужаев И.К., Хамдамов М.М. Численные алгоритмы расчета турбулентных струйных течений реагирующих газов: Монография. – Т. Бухара: "Sadridin Salim Buxoriy" Durдона, 2022. – 124 с., ISBN 978-9943-8486-5-8
2. Hamdamov M.M. Three-Dimensional study of the wind flow field flowing a wind generator based on modern turbulence models: Монография. – Молдова: Lap Lambert academic publishing is a trademark, 2024 – 73 с. ISBN: 978-620-8-01164-2
3. Hamdamov M.M., Ishnazarov A.I., Mamadaliev K.A. Numerical Modeling of Vertical Axis Wind Turbines Using Ansys Fluent Software. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, 13772 LNCS, pp. 156–170. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30258-9_14. (№ 11 Springer, № 3 Scopus Q3. IF=0.35).
4. Khujaev I.K., Fayziev R.A., Hamdamov M.M. Numerical solution of the combustion process using the computer package Ansys Fluent. Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2023, 13772 LNCS 13772, pp. 1–12, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30258-9_3. (№ 11 Springer, № 3 Scopus Q3. IF=0.35).
5. Hamdamov M.M., Fayziyev R.A., Muzaffarov S.S. Numerical simulation of wind turbines conducted using COMSOL software. E3S Web of Conferences 541, ISSN 2267-1242, 01001 (2024) WFCES 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454101001>. (№3 Scopus IF=0.20).
6. Khujaev I.K., Hamdamov M.M. Axisymmetric turbulent methane jet Propagation in a co-current air flow under combustion at a finite velocity. Herald of the Bauman Moscow State Technical University, 2021, (5), стр. 89–108. DOI: 10.18698/1812-3368-2021-5-89-108 (№ 3 Scopus Q3. IF=0.26).
7. Хамдамов М.М., Тоиров О.З., Хужаев И.К., Павлов П.П., Хуснутдинов А.Н., Мухамедзянов Э.А. Математическое и численное моделирование ветротурбины малой мощности в программном комплексе Comsol // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 2 (62). С. 34-53. (05.00.00; МДХ № 25, eLIBRARY ID: 21755164).
8. Хамдамов М.М. Численное исследование обтекания аэродинамического профиля на основе современных моделей турбулентности // Узбекский журнал: Проблемы механики, 2024, №3. – С. 69-78. (05.00.00; № 6).
9. Hamdamov M.M., Muzaffarov S.A. Modeling of a low-power wind turbine with a vertical axis of rotation within the framework of the Ansys Fluent software package. Journal of Hydraulics and Environmental Engineering (JHEE)

2023, 2(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10030896>. (05.00.00; Scientific Journal Impact Factor № 23)

10. Hamdamov M.M., Muzaffarov S.A., Boborahimova M.I. Modeling turbulent flow around a thin rectangle using the $k-\varepsilon$ turbulence model in Comsol Multiphysics. American Journal of Engineering, Mechanics and Architecture Volume 3, Issue 5, 2025 ISSN (E): 2993-2637. Pp. 262-273 (ResearchBib №14)

11. Toirov O., Taniev M., Hamdamov M.M., Sotiboldiev A. Power Losses Of Asynchronous Generators Based On Renewable Energy Sources. E3S Web of Conferences 434, 01020 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401020> ICECAE 2023. (№3 Scopus IF=0.20).

12. Hamdamov M.M., Ravshanov Sh.A., Muzaffarov S.A. Математическая модель ветротурбины малой мощности с вертикальной осью // Central Asian Journal of Education and Innovation. Volume 2, Issue 9, September 2023 <https://doi.org/10.5281/zenodo.8336961>. (ResearchBib №14)

13. Hamdamov M.M. Modeling of a Low-Power Wind Turbine with a Vertical Axis of Rotation within the Framework of the Comsol // Medicon Engineering Themes Volume 5 Issue 6 December 2023 Article Type: Research Article ISSN: 2834-7218. Pp.45-58 (CrossRef №35)

14. Хамдамов М.М. Математическое моделирование маломощного ветрогенератора с вертикальной осью вращения в рамках программного пакета Ansys Fluent // Узбекский журнал: Проблемы информатики и энергетики. Ташкент, 2023. №2. – С. 61-72. (05.00.00; № 5).

15. Хамдамов М.М., Музаффаров С.А. Численное моделирование ветротурбины в программном комплексе Comsol // Узбекский журнал: Проблемы механики, 2024, №1. – С. 74-91. (05.00.00; № 6).

16. Hamdamov M.M. Development of a wind power plant model for simulation modeling. Journal of Hydraulics and Environmental Engineering (JHEE) 2024, 2(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10700345>. (05.00.00; Scientific Journal Impact Factor № 23)

17. Хамдамов М.М., Аминов Х.Х. Разработка модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования // Лучшие интеллектуальные исследования. Часть-10, Том-6. -С.138-153 <http://web-journal.ru/> (05.00.00; ResearchBib №14)

18. Khujaev I.K., Fayziev R.A., Hamdamov M.M. Restriction in Flow Area in Gas Network. Springer Nature Switzerland AG 2024 NEW2AN 2023/ru SMART 2023, LNCS 14543, pp. 1–11, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60997-8_7. (№ 11 Springer, № 3 Scopus Q3. IF=0.35).

19. Madaliev M.E., Malikov Z.M., Fayziev R.A., Hamdamov M.M. Numerical Investigation of Laminar-Turbulent Flow in a Suddenly Expanding Channel. Springer Nature Switzerland AG 2024 NEW2AN 2023/ru SMART 2023, LNCS 14543, pp. 1–10, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60997-8_8. (№ 11 Springer, № 3 Scopus Q3. IF=0.35).

20. Хамдамов М.М., Музаффаров С.А. Моделирование обтекания тонкого прямоугольника турбулентным потоком с привлечением $k-\varepsilon$ модели

II-bo'lim (II часть; II part)

21. Hamdamov M., Fayziev R., Aminov Kh., Muzaffarov S. A numerical study of turbulent flows a round a NASA 0012 profile for wind turbines using the k-e model. In The 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS 24), 2024, ISBN 979-8-4007-1170-1/2024/12 <https://doi.org/10.1145/3726122.3726151> (№3 Scopus IF=0.26).

22. Hamdamov M., Fayziev R., Ravshanov Sh., Muzaffarov S. Formation of an Econometric Model and Their Economic Analysis Based on the Results of Experiments Conducted on a Vertical Axis Wind Turbine. In The 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS '24), ACM, ISBN 979-8-4007-1170-1/2024/12, <https://doi.org/10.1145/3726122.3726152> (№3 Scopus IF=0.26).

23. Khujaev I., Toirov O., Jumayev J., Hamdamov M.M. Modeling of vertical axis wind turbine using Ansys Fluent package program. E3S Web of Conferences 401, ISSN 2267-1242, 04040 (2023) CONMECHYDRO – 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104040>. (№3 Scopus IF=0.20).

24. Fayziev R.A., Hamdamov M.M. Model and program of the effect of incomplete combustion gas on the economy. ACM International Conference Proceeding Series, 2021, стр. 401–406. <https://doi.org/10.1145/3508072.3508147>. (№ 3 Scopus IF=0.26).

25. Hamdamov M.M., Bozorov B., Mamataliyeva H., Ergashov D. Numerical modeling of wind turbine with vertical axis using turbulence model in Ansys Fluent. E3S Web of Conferences 401, ISSN 2267-1242, 02024 (2023) Conmechydro – 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340102024>. (№3 Scopus IF=0.20).

26. Madaliev M. E., Mamadaliyev H.A., Hamdamov M.M. Fluid Dynamics Simulation of Twin Square Cylinders Interaction Using a Two Fluid Turbulence Model Malikov. International Conference: “Ensuring Seismic Safety and Seismic Stability of Buildings and Structures, Applied Problems of Mechanics” AIP Conf. Proc. 3265, 2025, ISSN 0094 -243X, 060014-1–060014-9; <https://doi.org/10.1063/5.0265171> (№3 Scopus IF=0.15).

27. Hamdamov M, Muzaffarov S. Simulation of turbulent flow around a thin rectangle using k - ε turbulence and environment models Comsol Multiphysics. International Conference: “Ensuring Seismic Safety and Seismic Stability of Buildings and Structures, Applied Problems of Mechanics” AIP Conf. Proc. 3265, 2025, ISSN 0094-243X, 060013-1–060013-7; <https://doi.org/10.1063/5.0265168> (№3 Scopus IF=0.15).

28. Хамдамов М.М., Музаффаров С.А., Эргашов Д.Й. Шамолнинг паст тезлигида ишловчи вертикал ўқли шамол турбинасини Simulink ёрдамида моделлаштириш / СамДУ Каттакўрғон филиалида «Таълимда

сунъий интеллектнинг роли» мавзусидаги республика конференцияси, 16-17 июнь 2023. – С. 55-58.

29. Хамдамов М.М., Музаффаров С.А., Мамадалиев Х.А., Собиров А.М. Численное исследование обтекания аэродинамического профиля BELL 540 на основе современных моделей турбулентности // Andijan State University Named After Zakhiriddin Mukhammad Babur, Scientific Bulletin 2024/№1(6). (01.00.00; № 6).

30. Хамдамов М.М., Рахмонова Н.Н., Камолова С.Ж. Разработка модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования. ICT EDU 2024 Respublika ilmiy-uslubiy anjumani Toshkent, 4-5-yanvar, 2024. – С. 68-72.

31. Хамдамов М.М., Музаффаров С.А. Simulation of turbulent flow around a thin rectangle using k-ε model turbulence and environment models comsol Multiphysics / Сборник докладов Международной научной конференции: Механика, сейсмостойкость, машиностроение по проблемам «Обеспечения сейсмической безопасности и сейсмостойкости зданий и сооружений, решению прикладных задач механики», III Том. 27-29 мая, 2024. – С. 73-78.

32. Hamdamov M.M., Muzaffarov S.A, Ergashov D.Y. Shamolning past tezigida ishlovchi vertikal o'qli shamol turbinasini Simulink yordamida modellashtirish / SamDUKF. «Ta'limda sun'iy intellektning ro'li» mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi. 16-17 iyun, 2023. – С. 55-58.

33. Hamdamov M.M., Jumaev J., Ergashev D.Y., Muzaffarov S.A. Numerical study of the flow away after Bell 540 aerodynamic profile based on the k-ε turbulence model. Сборник докладов международной научно-технической конференции Бухара, Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, 27-28 сентября 2024 г.

34. Hamdamov M.M., Mamadaliyev X.A., Ravshanov Sh.A. Vertikal o'qli shamol turbinasini Matlab dasturiy muhiti yordamida modellashtirish // 26.12.2022 yil № DGU 21704 guvohnoma O'zR Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi tomonidan berildi.

35. Hamdamov M.M., Muzaffarov S.A., Ravshanov Sh.A. Shamol turbinalarining elektr energiyasini ishlab chiqarishini Matlab/Simulinkda blok-sxema ko'rinishida modellashtirish // 03.05.2024 yil № DGU 33841 guvohnoma O'zR Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi tomonidan berildi.

36. Hamdamov M.M., Muzaffarov S.A., Ravshanov Sh.A. Aerodinamik tadqiqotlar asosida Vertikal o'qli shamol turbinalarining samarali parametrlarini aniqlash // 03.05.2024 yil № DGU 38568 guvohnoma O'zR Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi tomonidan berildi.

Avtoreferat «Mexanika muammolari» O'zbekiston jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazildi va o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarning mosligi tekshirildi.

Bosishga ruxsat etildi: ___ avgust 2025 yil