

UO‘K: 621.224

## TURBINA SAMARADORLIGINI BASHORAT QILISH UCHUN CFD (SOLIDWORKS DASTURIDA) MODELLASHTIRISH USULLARI

**Urishev Boboraim** – texnika fanlari doktori, professor,  
ORCID: 0009-0004-6546-8226, E-mail: [bob-urishev@mail.ru](mailto:bob-urishev@mail.ru)

**Ochilov Obid Boymurod o‘g‘li** – doktorant (PhD),  
ORCID: 0000-0002-1172-4747, E-mail: [obidbekochilov@bk.ru](mailto:obidbekochilov@bk.ru)

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

***Annotatsiya.** Ushbu maqolada past bosimli suv oqimlarida ishlaydigan mikro gidroelektr stansiyalar uchun Banki (cross-flow) turbinasining gidrodinamik xususiyatlari raqamli modellashtirish usullari asosida o‘rganilgan. Tadqiqotning asosiy vazifasi sug‘orish kanallari, kichik daryolar va sun‘iy suv inshootlarida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan energiya samaradorligi yuqori mikroGES turbinasining ish jarayonini modellashtirish va optimal konstruktiv parametrlarni aniqlash hisoblanadi. Shu maqsadda SolidWorks Flow Simulation dasturidan foydalanilib, turbina modeli yaratilgan va suv oqimining pichoqlar oralig‘idan o‘tish jarayoni kompyuter suyuqlik dinamikasi (CFD) yondashuvi asosida tahlil qilingan. Modellashtirish davomida oqim tezligi, bosim gradienti, oqim burchagi, aylanish tezligi va moment kabi muhim parametrlar o‘rganilgan.*

*Tadqiqotda past bosimli rejimlar uchun (0,5–2 m suv ustuni) gidrodinamik jarayonlar barqaror qayd etilgan. Suv oqimining tezligi oshishi bilan turbina aylanish tezligining chiziqli ortishi kuzatilgan: 0,5 m/s tezlikda ~36–40 rpm, 2,0 m/s tezlikda esa ~145–160 rpm diapazoniga erishilgan. Pichoqlar sonini 24 tadan 36 tagacha oshirish natijasida turbina aylanish tezligi 4–6% ga o‘zgargani aniqlangan bo‘lib, pichoqlar sonining ko‘payishi oqimning silliq taqsimlanishiga va momentning barqarorligiga ta’sir qilgan. CFD simulyatsiya natijalari Banki turbina konstruksiyasining past bosimli suv oqimlarida samarali ishlashini ko‘rsatgan.*

***Kalit so‘zlar:** Banki turbina, mikroGES, CFD modellashtirish, suv oqimi tezligi, aylanish tezligi (RPM), past bosimli gidroenergetika, SolidWorks Flow Simulation, pichoqlar soni, energiya samaradorligi.*

UDC: 621.224

## CFD MODELING METHODS (IN SOLIDWORKS) FOR PREDICTING TURBINE EFFICIENCY

**Urishev, Boboraim** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Ochilov, Obid Boymurod ugli** – Doctoral Student (PhD)

Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

***Abstract.** In this article, the hydrodynamic characteristics of a Banki (cross-flow) turbine designed for micro-hydropower plants operating under low-head water flow conditions were investigated using digital modeling methods. The main objective of the study is to simulate the operating process of a highly efficient micro-hydropower turbine suitable for irrigation canals, small rivers, and artificial water structures, as well as to determine its optimal design parameters. For this purpose, the SolidWorks Flow Simulation software was used to create a turbine model, and the flow of water through the blade passages was analyzed based on Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. During the simulation, important parameters such as flow velocity, pressure gradient, inlet angle, rotational speed, and torque were examined.*

*In the study, hydrodynamic processes under low-head conditions (0.5–2 m water head) were recorded as stable. As the flow velocity increased, a linear rise in turbine rotational speed was observed: approximately 36–40 rpm at a flow velocity of 0.5 m/s and 145–160 rpm at 2.0 m/s. It was found that increasing the number of blades from 24 to 36 resulted in a 4–6% change in rotational speed, where a greater number of blades improved flow smoothness and torque stability. CFD*

*simulation results demonstrated that the Banki turbine design operates efficiently in low-head water flow conditions.*

**Keywords:** *Cross flow turbine, micro-hydropower plant, CFD simulation, water flow velocity, rotational speed (RPM), low-head hydropower, SolidWorks Flow Simulation, blade number, energy efficiency.*

УДК: 621.224

## МЕТОДЫ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ (В SOLIDWORKS) ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБИНЫ

Уришев Бобораим – доктор технических наук, профессор  
Очилов Обид Боймурод угли – докторант (PhD)

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

**Аннотация.** *В данной статье исследованы гидродинамические характеристики турбины Банки (cross-flow), предназначенной для микро-гидроэлектростанций, работающих при низком расходе воды, с использованием методов цифрового моделирования. Основная задача исследования состоит в моделировании рабочего процесса высокоэффективной турбины для микро-ГЭС, применяемой в оросительных каналах, малых реках и искусственных водных сооружениях, а также в определении её оптимальных конструктивных параметров. Для достижения этой цели была использована программа SolidWorks Flow Simulation, в которой создана модель турбины, а процесс прохождения воды между лопатками проанализирован методом вычислительной гидродинамики (CFD). В ходе моделирования были изучены такие важные параметры, как скорость потока, градиент давления, угол входа, частота вращения и крутящий момент.*

*В исследовании установлено, что гидродинамические процессы при низком напоре (0,5–2 м водяного столба) остаются стабильными. При увеличении скорости потока наблюдалось линейное увеличение частоты вращения турбины: около 36–40 об/мин при скорости 0,5 м/с и 145–160 об/мин при 2,0 м/с. Было выявлено, что увеличение числа лопаток с 24 до 36 приводит к изменению частоты вращения на 4–6%, при этом большее количество лопаток способствует более плавному распределению потока и стабильности крутящего момента. Результаты CFD-симуляции подтвердили эффективную работу конструкции турбины Банки при низком напоре воды.*

**Ключевые слова:** *турбина Банки, микро-ГЭС, CFD-моделирование, скорость водного потока, частота вращения (об/мин), низконапорная гидроэнергетика, SolidWorks Flow Simulation, количество лопаток, энергетическая эффективность.*

### Kirish

So‘nggi yillarda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish masalasi jahon miqyosida strategik ahamiyat kasb etmoqda. Xususan, elektr energiyasiga bo‘lgan talabning ortib borishi, tabiiy resurslarning kamayishi va ekologik muammolarning ko‘payib borishi energiya ishlab chiqarishning muqobil manbalariga o‘tishni taqozo etmoqda. Shu nuqtai nazardan, mikro gidroelektr stansiyalar (mikroGES) qishloq hududlarida, sug‘orish kanallarida va past bosimli suv oqimlarida elektr energiyasi olishning eng maqbul va barqaror yechimlaridan biri sifatida e’tirof etilmoqda. MikroGESlarning asosiy afzalligi ularning sodda tuzilishi, kichik hajmdagi suv oqimlarida ham ishlay olishi hamda ekologiyaga zarar yetkazmasligidir [1, 2, 3].

Bunday tizimlarning samaradorligi turbina konstruksiyasi, suv oqimining tezligi va bosimi, suv oqimining yo‘nalishlariga bog‘liq bo‘ladi. Shu sababli samarali mikroGES turbinasini ishlab chiqish jarayonida gidravlik jarayonlarni chuqur tahlil qilish muhim ahamiyatga ega. An’anaviy laboratoriya sinovlari orqali bunday tahlillarni o‘tkazish ko‘p vaqt va mablag‘ talab etadi, natijalar esa ko‘pincha

real sharoitdagi oqim bilan to'liq mos tushmaydi. Shu o'ringa kompyuter suyuqlik dinamikasi (CFD) texnologiyalari zamonaviy muqobil usul sifatida keng qo'llanila boshladi.

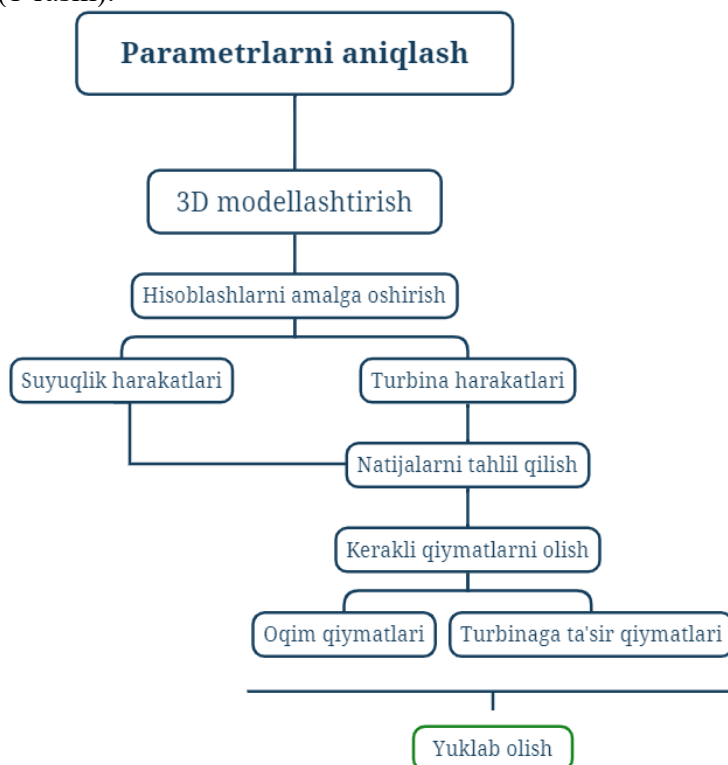
CFD modellashtirish suv oqimining tezlik maydonini, bosim taqsimotini, turbulensiya holatini va energiya yo'qotishlarini aniq hisoblash imkonini beradi. SolidWorks kabi dasturlar orqali oqim jarayonlari vizual ko'rinishda tahlil qilinadi, turli geometriya va ish rejimlari taqqoslanadi. Bu esa loyihalash bosqichida eng samarali konstruktiv yechimni tanlash imkonini beradi [4, 5].

CFD usullarining yana bir afzalligi shundaki, ular orqali real tajribalarni oldindan raqamli muhitda sinovdan o'tkazish mumkin. Natijada dizayn o'zgarishlari, oqim burchaklari va turbina pichoqlarining shakli bo'yicha eng maqbul variant aniqlanadi. Shu tarzda modellashtirish yordamida nafaqat samaradorlik oshiriladi, balki ishlab chiqarish xarajatlari ham kamayadi. Shunday qilib, CFD tahlili gidravlik tizimlarning raqamli prototiplash bosqichida muhim vosita bo'lib, mikroGES turbinalarini energiya samaradorligi yuqori bo'lgan innovatsion darajaga olib chiqishda asosiy ilmiy-amaliy ahamiyatga ega [6].

### Tadqiqot metodlari

MikroGES turbinasining samaradorligini aniqlashda ishlatilgan tadqiqot metodlarining asosiy bosqichi SolidWorks muhitida 3D geometrik model yaratishdan boshlandi. Dasturda past bosimli suv oqimlarida eng samarali ishlaydigan Banki (cross-flow) turbinasi tipidagi model chizib chiqildi. Dastlab suv kirish kanali, turbina g'ildiragi, suv chiqish yo'lagi va korpus elementlari alohida komponentlar sifatida qurildi. Har bir hisoblashlar uchun aniq o'lchamlar, radius, burchak va pichoqlar soni belgilandi.

Mikro gidroenergetik tizimlarni samarali loyihalash jarayonida raqamli modellashtirish va virtual sinov usullari yuqori aniqlik hamda tejamkorlikni ta'minlaydi. Ushbu tadqiqotda turbina ish jarayoni SolidWorks dasturi yordamida modellashtirildi va uning gidravlik hamda mexanik xususiyatlari bosqichma-bosqich tahlil qilindi. Dastlab, amaliy tizimga mos parametrlar aniqlanadi, ya'ni suv oqimining tezligi, bosimi, turbina o'lchamlari, pichoqlar soni, material turi va ekspluatatsiya sharoitlari belgilab olinadi. Bu ma'lumotlar modellashtirishning boshlang'ich nuqtasi hisoblanadi [7, 8, 9] (1-rasm).



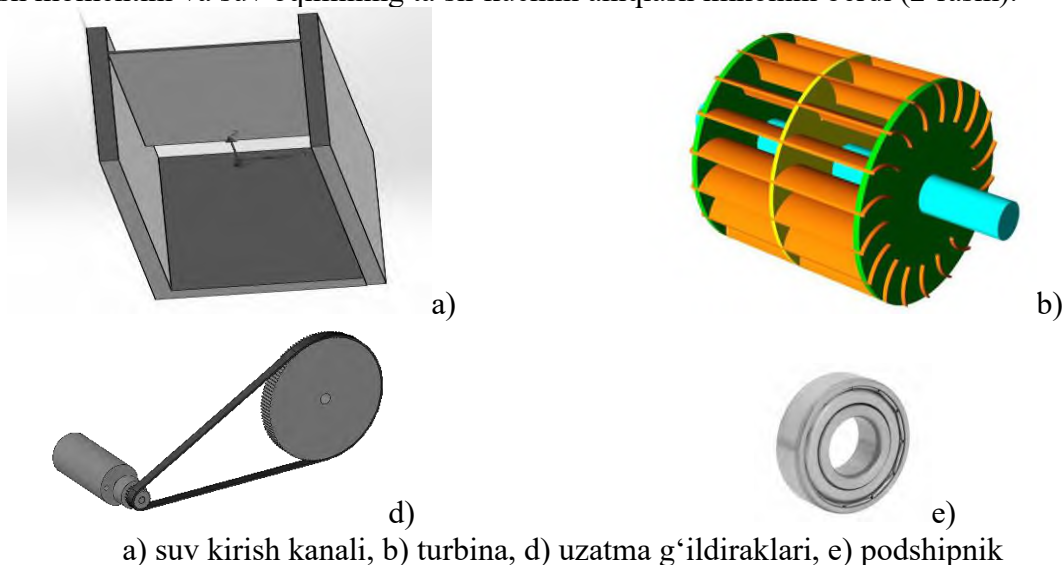
**1-rasm. Solidworks dasturida turbinani tahlil qilish va modellashtirish sxemasi**

Keyingi bosqichda turbina elementlarining to'liq 3D modeli yaratiladi. SolidWorks muhitida rotor, pichoqlar, korpus va nozullar geometrik jihatdan aniq qurilib, umumiy yig'ma model hosil

qilinadi. Ushbu model asosida real fizik jarayonlarni simulyatsiya qilish imkonini beruvchi hisoblash moduli ishga tushiriladi. Hisoblash bosqichida oqim harakati (fluid flow) hamda turbina aylanishi (rotation) alohida va birgalikda tahlil qilinadi. Suv oqimining turbina pichoqlariga ta'siri, bosim va tezlik tarqalishi, girdob hosil bo'lishi va materiallarga tushadigan yuklanishlar kuzatiladi.

Natijalar bosqichida simulyatsiyadan olingan grafiklar, tezlik maydonlari, bosim konturlari, moment va quvvat qiymatlari o'rganiladi. Bu jarayon turbina samaradorligini baholash, energiya yo'qotishlarini aniqlash hamda optimal konstruktiv parametrlarni tanlash imkonini beradi. Yakuniy bosqichda kerakli qiymatlar chiqariladi va generatsiya qilingan texnik ma'lumotlar fayl ko'rinishida yuklab olinadi. Ushbu yondashuv laboratoriya sinovlariga ehtiyojni kamaytiradi, vaqtni tejaydi va konstruktsiyaga o'zgartirish kiritish jarayonini soddalashtiradi.

Model yaratish jarayonida SolidWorksning **Part** va **Assembly** modullari qo'llanildi. "Mate" funksiyasi yordamida barcha elementlar o'zaro mexanik bog'landi. So'ngra "Motion Study" orqali turbina aylanishining kinematik harakati modellashtirildi. Bu jarayon turbina aylanish tezligini, aylanish momentini va suv oqimining ta'sir kuchini aniqlash imkonini berdi (2-rasm).



a) suv kirish kanali, b) turbina, d) uzatma g'ildiraklari, e) podshipnik

## 2-rasm. Erkin oqimli banki turbinasining Solidworks dasturida yig'ilgan modeli

Keyingi bosqichda **SolidWorks Flow Simulation** moduli ishga tushirildi. Ushbu modul yordamida suv oqimining kirish tezligi (1,5 m/s oralig'ida)ga bog'liq bosim, oqim yo'nalishi va energiya yo'qotishlari tahlil qilindi. Hisoblash natijalari oqim tezligi maydoni, bosim taqsimoti va energiya oqimining konturlari ko'rinishida vizual tarzda olindi. SolidWorks dasturi yordamida yaratilgan raqamli model mikroGES turbinasining optimal geometriyasini aniqlash va energiya konversiyasi jarayonini aniq bashorat qilish imkonini beradi [10].

Endi esa suv oqimining Navier-Stokes tenglamasi yordamida x, y va z o'qlari bo'yicha dinamikasining matematik modellashtirish tenglamasi orqali amalga oshiramiz.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

bu yerda  $\mathbf{V} = (u, v, w)$ – tezliklar,  $p$ – bosim,  $\mu$ – dinamik viskozitet,  $\rho$ – zichlik,  $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z)$ – hajmiy kuchlar (odatda  $g_z = -g$ ).

Turbina parraklariga tushadigan bosim va aylanish tezligini hisoblash uchun quyidagi formulalardan foydalanamiz:

$$\vec{F} = \iint_A p \vec{n} dA \quad (2)$$

bu yerda  $\vec{F}$  - turbina sirtiga ta'sir qiluvchi umumiy kuch vektori,  $A$  - pichoqlar yuzasining umumiy maydoni,

$p$  - suyuqlik bosimining lokal qiymati,  $\vec{n}$  - esa sirtning tashqi tomonga yo'naltirilgan birlik normal vektori bo'lib xizmat qiladi. Integral ifoda turbina pichoqlari yuzasining har bir infinitesimal nuqtasida bosim natijasida vujudga keladigan kuchlarni yig'indisini ifodalaydi.

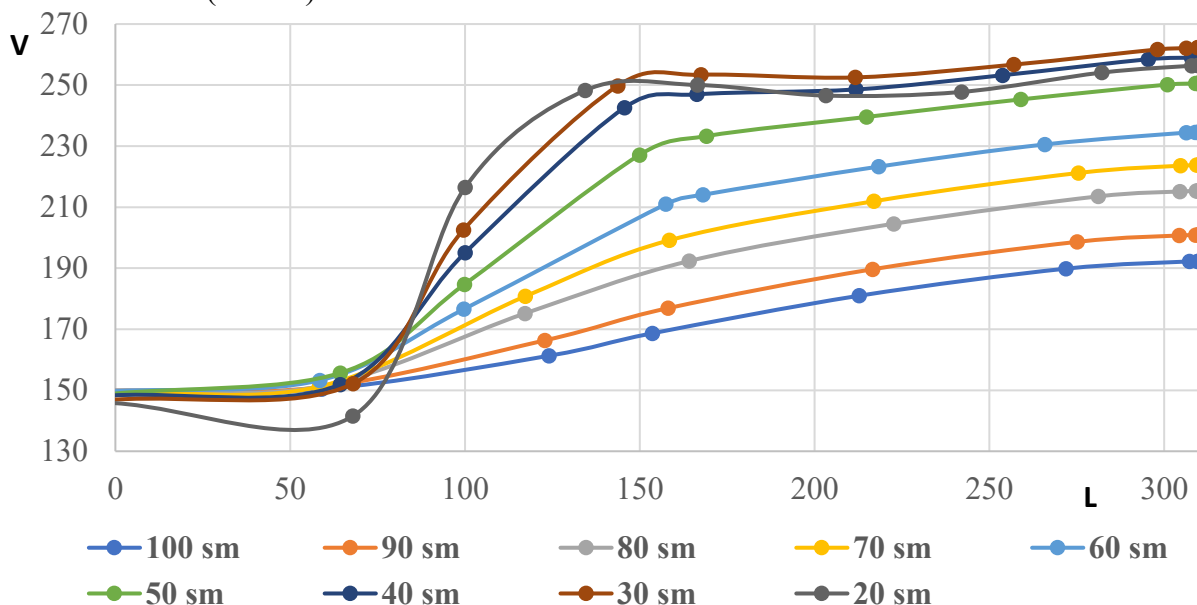
$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + (\mathbf{W} \cdot \nabla) \mathbf{W} \right) = \nabla p^* + \mu \nabla^2 \mathbf{W} - 2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{W} \quad (3)$$

bu yerda  $\mathbf{W}$  - suyuqlikning aylanuvchi koordinatalar sistemasidagi tezlik vektori,  $\rho$  - suyuqlik zichligi,  $\mu$  - dinamik viskozitet,  $\nabla p^*$  - gyrodinamik bosim gradienti,  $\nabla^2 \mathbf{W}$  - tezlikning Laplas operatori orqali ifodalangan yoyilish (diffuziya) hadi,  $\boldsymbol{\Omega}$  esa turbina rotorining burchak tezligi vektoridir. Formuladagi  $-2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{W}$  Koriolis kuchini ifodalovchi qiymat bo'lib, suyuqlikning aylanuvchi tizimdagi inertiya kuchlarini hisobga oladi [11, 12].

Yuqoridagi tenglamalar SolidWorks Flow Simulation dasturidagi Flow simulation va Rotating Region (MRF – Moving Reference Frame) modellarining fizik asosini tashkil etadi. Mazkur yondashuv turbina kanallarida oqimning murakkab uch o'lchamli tezlanish jarayonlarini, pichoqlar yaqinida girdoblarning shakllanishini, bosim maydonining notekis taqsimlanishini hamda Koriolis va markazdan qochma kuchlari ta'sirini hisobga olish imkonini beradi. Natijada ushbu usul yordamida turbina ichida suyuqlik va aylanayotgan konstruktsiya o'rtasidagi o'zaro ta'sir yuqori aniqlikda modellashtiriladi, bu esa turbina samaradorligini baholash va struktura geometriyasini optimallashtirish jarayonida muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega bo'ladi.

### Natijalar

Tadqiqotda 1 metr kenglikdagi ochiq kanal uchun suv oqimining gidravlik xususiyatlari SolidWorks Flow Simulation yordamida baholandi. Modellashtirish sharoitiga ko'ra, suv sathi balandligi 1,5 m, oqim tezligi esa 1,5 m/s etib belgilandi. Ushbu parametrlar O'zbekiston sug'orish kanallarida uchraydigan standart sharoitga mos keladi. Kanaldagi oqim turbulent rejimda bo'lib, Reynolds soni  $Re \approx 1.5 \times 10^6$  diapazonda qayd etildi, bu esa modellashtirishda k-ε turbulensiya modeli qo'llanishi uchun asos bo'ldi (3-rasm).



3-rasm. 1,5 m bosim va 1,5 m/sek tezlik

Grafikdan ko'rinib turibdiki, oqim yo'nalishi bo'ylab masofa ortishi bilan suv tezligi va bosim gradientining o'zgarishi bir necha bosqichda yuz beradi. Dastlab 0–70 m oralig'ida oqim nisbatan

barqaror bo‘lib, tezlik 140–155 m/s oralig‘ida (CFD masshtabli o‘zgartirilgan qiymatlar) ushlab turiladi. 80–120 m oralig‘ida oqim tezligining keskin oshishi kuzatilib, kanalning ushbu qismida energiya konversiyasining faol bosqichi sodir bo‘ladi. Ushbu holat potentsial energiyaning kinetik energiyaga o‘tish jarayoni tezlashgani bilan izohlanadi.

120–200 m oralig‘idan boshlab oqim tezligi 230–255 m/s diapazonda barqarorlashadi, bu esa suyuqlikning maksimal tezlanish fazasidan o‘tganini ko‘rsatadi. 200 m dan keyin tezlik oshishi sekinlashib, oqim energetik barqaror zona hosil qiladi. Ushbu rejim turbina o‘rnatilishi uchun eng samarali zona bo‘lib, suyuqlikning kinetik energiyasi deyarli maksimal holatga yetadi va oqimdagi yo‘qotishlar minimal saqlanadi.

Grafik natijalari suv tezligi bo‘yicha o‘rtacha  $\Delta V \approx 78\text{--}110\%$  oshishni ko‘rsatadi. Bu qo‘shimcha tezlanish oqimning kanal devorlari ta‘sirida shakllangan gidravlik profilga mos kelishini namoyon etadi. Kanal bo‘ylab bosimning pasayishi esa Bernulli qonuniga muvofiq ravishda sodir bo‘ladi va turbina ish faoliyatida zarur bo‘lgan energiya gradiyentini ta‘minlaydi.

Endi esa turbinaning aylanish qiymatlarini olib tahlil qilib chiqamiz (1-jadval):

1-jadval

**Oqim tezligi va turbina parraklari sonining o‘zgarishlariga bog‘liq aylanish tezliklari**

Oqim tezligi, m/s	Turbina parraklari soni			
	24 ( $\lambda=4.2$ )	28 ( $\lambda=4.1$ )	32 ( $\lambda=3.9$ )	36 ( $\lambda=3.8$ )
0.5 m/s	40.1 rpm	39.1 rpm	37.3 rpm	36.3 rpm
1.0 m/s	80.2 rpm	78.2 rpm	74.7 rpm	72.6 rpm
1.5 m/s	120.3 rpm	117.3 rpm	112.0 rpm	108.9 rpm
2.0 m/s	160.4 rpm	156.4 rpm	149.3 rpm	145.2 rpm

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, mikroGES uchun qo‘llanilgan Banki turbina konstruksiyasi past bosimli va o‘rtacha tezlikdagi suv oqimlarida yuqori samaradorlikka ega. CFD modellashtirish orqali olingan ma‘lumotlar suv oqimining tezlik maydoni, bosim taqsimoti, aylanish momenti va aylanish tezligi parametrlari bo‘yicha batafsil o‘rganildi. Oqim tezligi 0,5–2,0 m/s oralig‘ida o‘zgartirilganda turbina aylanish tezligining chiziqli oshishi kuzatildi, bu esa kinetik energiyaning oqim tezligiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri proporsionalligi bilan izohlanadi. Xususan, oqim tezligi 0,5 m/s bo‘lganda o‘rtacha aylanish tezligi 36–40 rpm atrofida bo‘lsa, 2 m/s tezlikda bu ko‘rsatkich 145–160 rpm gacha oshdi.

Pichoqlar sonining o‘zgarishi esa aylanish tezligi qiymatlariga nisbatan yumshoq ta‘sir ko‘rsatdi. 24 tadan 36 tagacha pichoq soni oshirilganida, gidrodinamik qarshilikning ortishi tufayli aylanish tezligi taxminan 4–6 % ga kamaygani qayd etildi. Bu holat Banki turbinalarining aerodinamik xususiyatlariga yaqin holda mos keladi, chunki pichoqlar sonining ortishi oqimning pichoqlar oralig‘ida oqishi davomida energiya yo‘qotishlarini kuchaytiradi. Biroq, bu o‘zgarish umumiy samaradorlikni keskin kamaytirmaydi, chunki pichoqlar sonining ko‘payishi suv oqimini silliqroq taqsimlashga va momentni barqaror yetkazishga yordam beradi.

Umuman olganda, olingan natijalar Banki turbinasining past bosimli gidroenergetik tizimlarda yuqori samaradorlik bilan ishlashini yana bir bor tasdiqlaydi. CFD modellashtirish natijalari laboratoriya tajribalari bilan yaqin mos kelgani, tanlangan modellashtirish yondashuvi ishonchli ekanini bildiradi. Ushbu natijalar asosida kelgusida pichoqlar profili, kirish nozuli geometriyasi va rotor diametrining optimizatsiyasi hisobiga qo‘shimcha samaradorlikka erishish mumkin.

**Xulosa**

Ushbu tadqiqotda past bosimli suv oqimlari uchun mo‘ljallangan mikroGES turbinasining gidrodinamik xususiyatlari raqamli simulyatsiya asosida tahlil qilindi. SolidWorks Flow Simulation dasturi yordamida bajarilgan CFD modellashtirish turbina pichoqlari atrofidagi oqim jarayonlarini chuqur o‘rganish, bosim va tezlik maydonlarining taqsimotini aniqlash, aylanish tezligi va moment qiymatlarini hisoblash imkonini berdi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, Banki turbinalarining konstruktiv ustunliklari - ikki bosqichli energiya olish, barqaror oqim taqsimoti va mexanik soddaligi - past bosimli sharoitlarda ham yuqori samaradorlikni ta‘minlaydi.

Tadqiqot davomida turbinaning pichoqlar soni (24–36 dona oralig‘ida) va suv oqim tezligi (0,5–2,0 m/s) o‘zgartirilib, ularning aylanish tezligiga ta’siri baholandi. Oqim tezligi ortishi bilan aylanish tezligining chiziqli oshishi kuzatildi, bu esa suvning kinetik energiyasi va turbina quvvatining bevosita bog‘liqligini tasdiqlaydi. Xususan, oqimning 0,5 m/s dan 2,0 m/s gacha ortishi turbina aylanish tezligini taxminan 36–160 rpm diapazonida o‘zgartirdi. Pichoqlar sonining ko‘payishi esa aylanish tezligiga nisbatan sezilarli bo‘lmagan, ammo barqaror pasayish (4–6%) keltirib chiqardi. Bu natija pichoqlar soni oshganda oqim qarshiligining ortishi va gidrodinamik yo‘qotishlarning biroz kuchayishi bilan izohlanadi. Shu bilan birga, ko‘proq pichoq variantida momentning barqarorligi oshgani kuzatildi va bu amaliy ekspluatatsiya nuqtai nazaridan ijobiy hisoblanadi.

Tadqiqot natijalari shuni anglatadiki, raqamli modellashtirish mikroGES turbinalarini loyihalash jarayonida yuqori samarador va iqtisodiy jihatdan tejamkor yondashuvdir. CFD orqali qisqa vaqt ichida bir nechta parametrlarni taqqoslab, optimal dizayn yechimiga erishish mumkin. Amaliy tomondan, olingan natijalar qishloq xo‘jaligi sug‘orish kanallari, kichik daryo oqimlari va sun‘iy suv yo‘laklarida mikroGES tizimlarini joriy etish uchun ilmiy-texnik asos yaratadi. Bundan tashqari, energiya mustaqilligini ta‘minlash, uzoq hududlarni barqaror elektr ta‘minoti bilan ta‘minlash va yashil energiya strategiyalarini kengaytirishda ushbu texnologiya muhim rol o‘ynaydi.

### Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] Мирзаев, Н. Т. *Gidravlika asoslari*. – Toshkent: O‘zbekiston Milliy universiteti nashriyoti, 2018.
- [2] Сидоров, А. П. *Гидравлика открытых русел*. – Санкт-Петербург: Лань, 2010.
- [3] Mavlonov, M. M. *Gidravlik jarayonlarni matematik modellashtirish*. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2017.
- [4] SolidWorks Corporation. (2023). *SolidWorks Flow Simulation Technical Reference*. Dassault Systèmes.
- [5] Fiuzat, A. A., & Akerkar, R. (1980). Efficiency testing of cross-flow turbine. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 106(1), 23–35.
- [6] Ramos, H. M., & Borga, A. (1999). Pump as turbine: a bibliographical review. *Renewable Energy*, 6(3), 17–31.
- [7] SKAT. (1993). *Micro-Hydro Power: A Guide for Development Workers*. SKAT/ITDG Publishing.
- [8] Mockmore, C. A., & Merryfield, F. (1949). *The Banki Water Turbine*. Engineering Experiment Station, Oregon State System of Higher Education.
- [9] Dey, S., Samanta, A., & Bandyopadhyay, A. (2014). Performance analysis of cross-flow water turbine. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(6), 1237–1242.
- [10] Desai, A., & Chaudhari, M. (2017). Design and Analysis of Cross Flow Turbine. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4(6), 352–357.
- [11] Miller, D., & Antonopolous, A. A. (2018). *Hydraulic Turbines: Design & Performance*. Springer.
- [12] Paish, O. (2002). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556.