

1- бөлім

Раздел 1

Section 1

Механика

Механика

Mechanics

УДК 532.5

<sup>1</sup> М.Б. Кошумбаев, Д.Е. Туралина, Д.Ж. Босинов \*<sup>1</sup> "Академик Ш.Ш. Шокин атындағы КазҒЗЭ институты" Акционерлік қоғамы, Республика  
Казахстан, г. Алматы

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы

\* E-mail: dansho.91@mail.ru

**Бөгетсіз ГЭС-терде қолданылатын бір бағыттағы ағыс гидротурбинының  
тиімді параметрлерін анықтау мақсатында жүргізілген теориялық және  
тәжірибелік зерттеулер**

Бұл мақалада бөгетсіз ГЭС терге арналған бір бағыттағы ағыс гидротурбинының тиімді параметрлерін анықтау мақсатында жүргізілген теориялық және тәжірибелік зерттеулер нәтижесі баяндалады.

Теориялық және тәжірибелік зерттеулер жүргізудің мақсаты гидротурбинаның электр қуатын өндіруін арттыру болып табылады.

Теориялық зерттеулер нәтижесінде гидротурбина роторында орналастырылатын қалақшалардың саны есептелінді. Қалақшалардың санына байланысты қалақшалардың қалыңдықтағы анықталды. Гидротурбина роторында орналастырылатын қалақшалардың әр түрлі пішіндері COMSOL Multiphysics бағдарламасында салынып, солардың ішіндегі ең тиімдісі анықталды. Тиімді деп таңдалған қалақшаның орналасу бұрышына сәйкес оның бойындағы судың жылдамдығының өзгерісі, судың қалақшаға түсіретін қысымы зерттелінді. Зерттеу нәтижесінде ең тиімді деп саналатын қалақшаның орналасу бұрышы анықталды, су қалақшаны ағып өткен кезінде құйын және кавитация процесі пайда болатындығына көз жеткізілді. Есеп сығылмайтын сұйықтықтарға арналған Навье-Стокс теңдеуіне Direct Numerical Simulation (DNS) әдісі қолданылып COMSOL Multiphysics бағдарламасында шығарылды.

Тәжірибелік зерттеулер академик Ш.Ш. Шокин атындағы КазҒЗ энергетика институтының гидротехникалық құрылыстар менсу электр станциясы зертханасында жүргізілді. Тәжірибелік зерттеуде судың шығынының өзгерісіне байланысты гидротурбина роторының минутына қанша айналым жасайтыны және қанша электр қуатын өндіретіні зерттелді.

**Түйін сөздер:** қайта жаңаратын энергия көздері, гидротурбина, қалақша, ротор, бөгетсіз ГЭС, генератор, COMSOL Multiphysics.

M.B. Koshumbaev, D.E. Turalina, D.Zh. Bossinov

**Theoretical and experimental investigations to define optimal parameters of straight-flow turbine for damless hydro power station**

In the article there are theoretical and experimental investigations presented with regards to determination of optimal parameters of straight flow turbine for damless hydro power stations. The goal for conducting theoretical and experimental investigations is to increase electric power of hydro turbines. Upon the results of the theoretical research, the amount of blades located in the rotor of the hydro turbine was calculated. The measures of blade thickness were undertaken depending on their overall number. To define the most optimal profile (shape), different blade profiles located in the rotor of the hydro turbine were preliminarily put into the COMSOL Multiphysics software.

Regarding the blade defined as the most optimal in accordance with its angle of location, calculations of inner flow water velocity changes along with water pressures experienced by the blade were produced. As a result of the research outcomes, the most optimal angle for blade location was calculated, it was possible to observe the processes of vortex and cavitation during water flows through the blade. The calculations with regards to incompressible liquids were measured with the help of COMSOL Multiphysics software through application of Direct Numerical Simulation (DNS) method on the base of Navier Stokes equation. The experimental investigations were conducted in the Laboratory of Hydro Power Stations and Hydro Power Constructions within the Kazakh Scientific Research Institute of Energy named after Sh. Chokin. In the framework of the experimental investigations there were defined a number of revolutions per minute with regards to the rotor of the hydro turbine depending on changes of water withdrawals as well as the amount of electric power generation.

**Key words:** renewable energy sources (renewables), hydro turbine, blade, rotor, hydro power station, generator, COMSOL Multiphysics.

М.Б. Кошумбаев, Д.Е. Туралина, Д.Ж. Босинов

#### **Теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальных параметров прямоточной гидротурбины для безплотинной ГЭС**

В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров прямоточной гидротурбины для безплотинной ГЭС. Целью проведения теоретических и экспериментальных исследований является повышение электрической мощности гидротурбины. По результатам теоретических исследований было определено оптимальное количество лопастей, располагаемых в роторе гидротурбины. В зависимости от их количества была найдена толщина лопасти. Для определения наиболее оптимального варианта, различные профили лопастей, располагаемых в роторе гидротурбины, были предварительно спроектированы (построены) в программе COMSOL Multiphysics. В отношении лопасти, определенной в качестве наиболее оптимальной, в соответствии с ее углом расположения были исследованы изменения скорости воды, проходящей через нее, а так же давление воды, оказываемое на лопасть. По результатам исследования был рассчитан самый оптимальный угол расположения лопасти, наблюдалось образования вихря и кавитационного процесса во время протекания воды через лопасть. Расчеты проводились с помощью программы COMSOL Multiphysics для уравнения Навье Стокса для несжимаемых жидкостей с применением метода Direct Numerical Simulation (DNS).

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории гидроэлектростанций и гидроэлектрических сооружений КазНИИ Энергетики имени академика Ш.Ч.Чокина. В рамках экспериментальных исследований были определены количество оборотов в минуту ротора гидротурбины в зависимости от изменения расходов воды, а так же количество выработки электрической мощности.

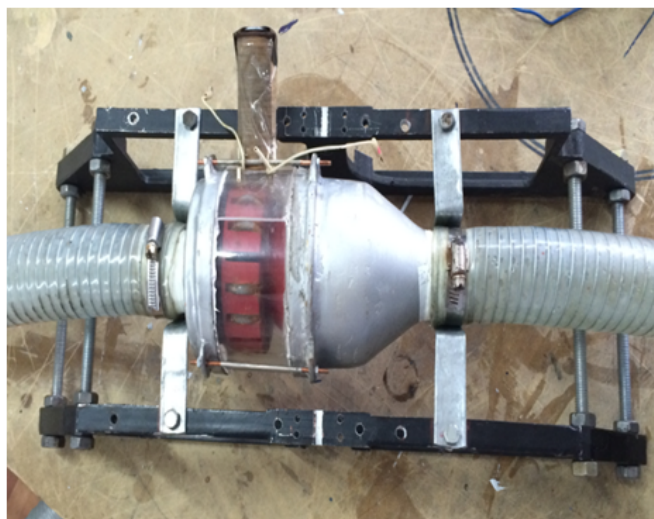
**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, гидротурбина, лопасть, ротор, безплотинная ГЭС, генератор, COMSOL Multiphysics.

Электр энергиясын өндірудің құнын төмендету қазіргі таңда негізгі мәселелердің бірі болып табылады. Электр энергиясын алатын дәстүрлі жылу станцияларында қолданылатын қатты, сұйық және газ тәріздес отындардың бағасы күннен күнге артуымен қоса, оның қоршаған ортаға зияны да көп болып отыр. Бұл станциялардың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін үлкен қаржы жұмсалыуымен қоса, күткен тиімділікті алып келмейді. Сондықтан да қайта жаңаратын энергия көздерін қолданған тиімді болады [4]. Соның бірі 1 суреттегі бөгетсіз ГЭС-терден электр қуатын өндіретін гидротурбина болып келеді [7]. Осы гидротурбинаның негізі бөлшегінің бірі қалақша болып табылады. Қалақша пішінінің ең тиімдісін берген жағдайда, гидротурбина роторының айналымы артып, ол өз кезегінде генератор орамында электр қуатының өндірілуін арттырады. Әр түрлі қалақшалардың пішіндері COMSOL Multiphysics бағдарламасында

салынды. Ең тиімді деп таңдалған қалақшаның орналасу бұрышы  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  болған кездегі судың жылдамдығы мен қысым эпюрасының өзгерістеріне байланысты графиктер алынды. Соған сәйкес қалақшаның ең тиімді орналасу бұрышы анықталды. Сонымен қоса бұл мақалада қалақшалардың санына байланысты қалақша қалыңдығы анықталды. Қарастырылған қалақшалардың ішіндегі ең тиімді деп саналған қалақша пішіні гидротурбина роторына орналастырылды. Соған байланысты гидротурбинада тәжірибелік зерттеулер академик Ш.Ш. Шокин атындағы ҚазҒЭ энергетика институтының гидротехникалық құрылыстар мен су электр станциясы зертханасында жүргізілді.

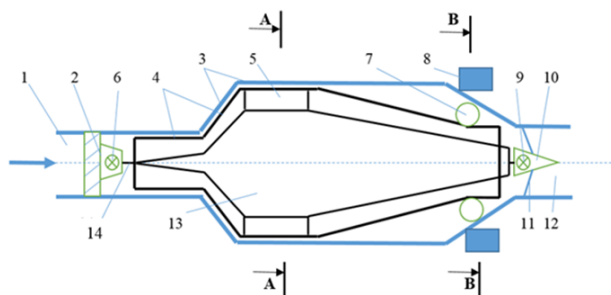
### Гидротурбина түсінігі

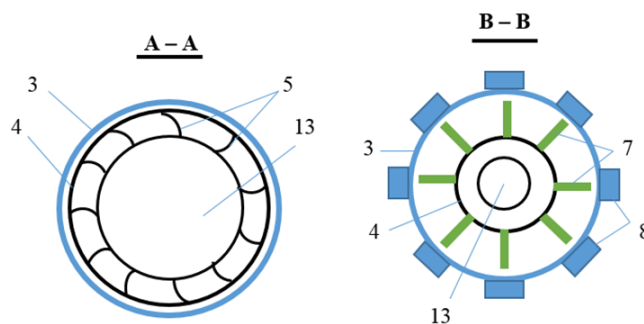
Гидротурбина - бұл өзіне алып келетін ағынның энергиясын гидротурбина роторындағы механикалық энергияға түрлендіретін гидравликалық қозғалтқыш. Ротор арқылы бұл қозғалтқыш гидрогенераторға жалғанады және олар гидроагрегат құрайды [7]. Осылайша, гидравликалық энергия гидротурбинада механикалық энергияға және одан кейін гидрогенераторда электр энергиясына түрленеді [1]. Біз қарастырып отырған бөгетсіз ГЭС-терде қолданылатын бір бағыттағы ағыс гидротурбины 1 суретте көрсетілген.



1 сурет – Бір бағыттағы ағыс гидротурбинының жалпы түрі

Бір бағыттағы ағыс гидротурбинының сызбасы мен  $A - A$  және  $B - B$  қималары 2 суретте көрсетілген.





2 сурет – Бір бағыттағы ағыс гидротурбинасының сызбасы

Гидротурбина келесі түрде жұмыс атқарады. Судың ағыны 1 су таратқыштан қозғала отырып, 2 құйындатқышқа кіріп, 13 роторды айнала ағады. Судың ағыны 5 қалақшаларға әсер етіп, сальнигі бар 6, 9 подшипниктерге бекітілген роторды өзінің 14 білігі бойында айналдырады. Ротордың айналымы 7 магниттерді қозғалысқа келтіруінің арқасында, 8 генератор орамында электр тоғын тудырады. Гидротурбинаны ағып өткен 12 су бағыттауышқа барады (2 сурет). Гидроагрегат 1 су таратқыштан, ағын ортасын 2 құйындатқыштан, 3 көлденең цилиндрлі қаптамадан, 4 диффузорлы-конфузорлық корпустың кескін үйлесімнен, 5 қалақшалардан, сальнигі бар 6, 9 подшипниктерден, 7 магниттерден, 8 генератор орамынан, 10 кавитацияны азайтқыш құрылғыдан, 11 подшипниктерді бекіткіштен, 12 су бағыттауыштан, 13 ротордан, ротордың айналу 14 білігінен тұрады [7].

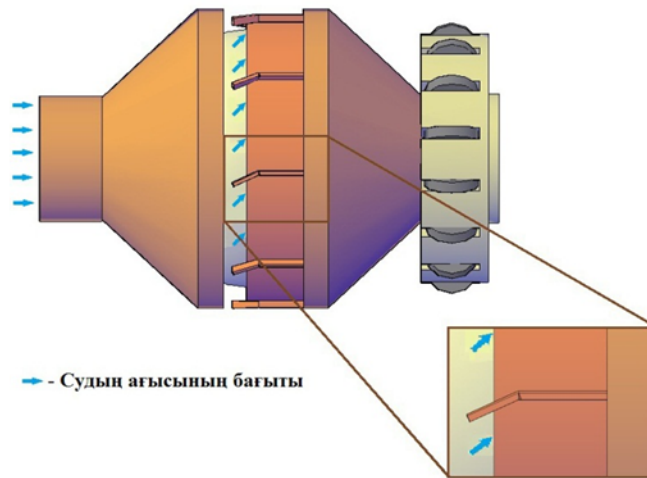
### Математикалық моделі

Қалақша бойындағы судың жылдамдығы мен қысым эпюрасының өзгерісі COMSOL Multiphysics бағдарламасындағы сығылмайтын сұйыққа арналған Навье-Стокс теңдеуіне Direct Numerical Simulation (DNS) әдісі қолданылып шығарылды [2]. Сығылмайтын сұйыққа арналған Навье-Стокс теңдеулер жүйесі қозғалыс және үзіліссіздік теңдеулерінен тұрады [2, 3, 5]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}$$

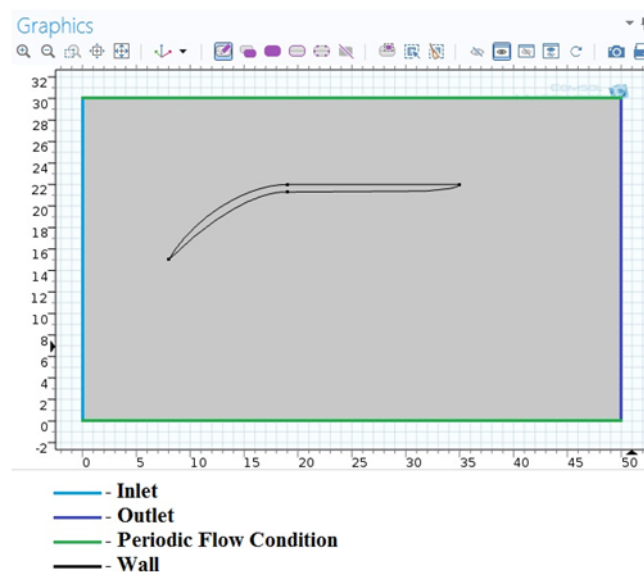
$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Үзіліссіздік теңдеуі массаның сақталу заңына, ал қозғалыс теңдеуі импульстің сақталу заңына негізделген [5]. Есепті COMSOL Multiphysics бағдарламасында шығару барысында гидротурбина роторында орналасқан қалақша бөлігі таңдап алынды (3 сурет).



3 сурет – Гидротурбина роторында орналасқан қалақша бөлігі

COMSOL Multiphysics бағдарламасында есепті сандық түрде шығару үшін екі өлшемді ауданға қалақша салынды (4 сурет).

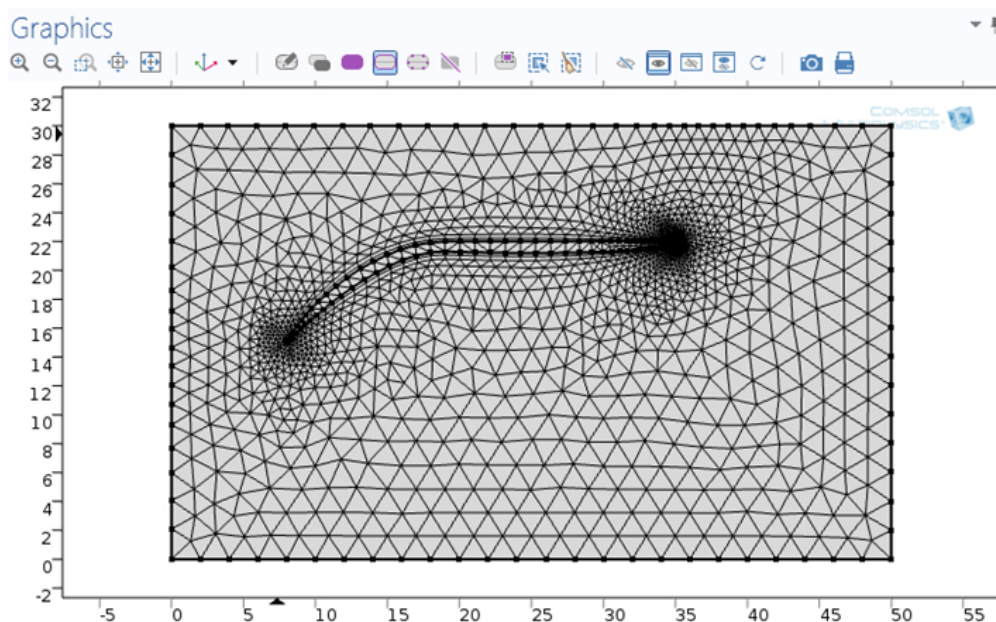


4 сурет – Есеп шығарылатын аудан

**Inlet:**  $u = u_0$

**Outlet:**  $[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)]\mathbf{n} = -\hat{p}_0\mathbf{n}, \hat{p}_0 \leq p_0$

**Periodic flow condition:**  $\mathbf{u}_{source} = \mathbf{u}_{dest}, p_{source} = p_{dest}$  **Wall:**  $u = 0$  Судың құбыр арқылы гидротурбинаға кіре беріс бөлігінде бағыттауыштар орналасқан, сол арқылы судың ағысы қалақшаға  $45^\circ$  пен бағытталады. Соған сәйкес судың бастапқы жылдамдық өрісін  $x$  және  $y$  бағытында  $1 \text{ м/с}$  деп бердік. Шекаралық шарттарға Periodic Flow Condition берген себебіміз қарастырылып отырған қалақшаға төменгі және жоғарыда орналасқан қалақшалар бойындағы судың жылдамдығының өзгерісі әсер етеді. Есеп шығарылатын аудандағы тордың жиілігі 5 суретте көрсетілген.



5 сурет – Қалақша пішіні бойындағы тордың сызбасы

Есеп шығарылатын тіктөртбұрыштың биіктігі 30 мм, ал ұзындығы 50 мм деп алынды. Қалақшаның ұзындығын 25 мм деп берілді. Есепті уақытқа тәуелді деп, арадан 20 с өткен кездегі судың жылдамдығы мен қысымның өзгерісінің графигі қалақшаның орналасу бұрышы  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  болған жағдайында есептелінді (6-11 суреттер). Мұнда қызыл түсті бағыт көрсеткіштер (стрелкалар) арқылы су ағысының бағыты бейнеленді. Су жылдамдығының өзгерісі қанық көк түстен қанық қызыл түс аралығында өзгеруі суреттің оң жақ бағанында көрсетілген. Судың түсі қанық көк болған жағдайда құйын мен кавитация процессін көрсетеді, ал қанық қызыл болған жағдайда жылдамдықтың барынша артқанын сипаттайды. Қысымның таралуына келсек, судың түсі қанық көктен қанық қызылға өзгерген кезде қысым барынша жоғарғы мәнге ие болады.

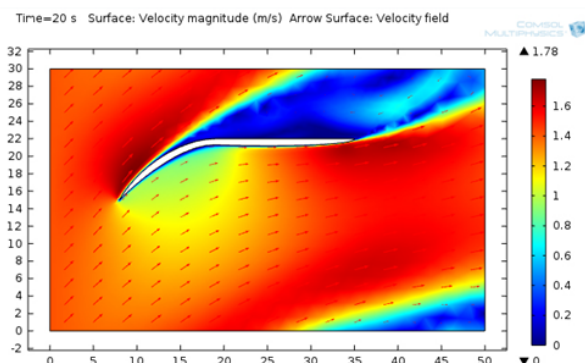
#### Қалақшаның орналасу бұрышы $0^{\circ}$ болған жағдай

Қалақшаның орналасу бұрышы  $0^{\circ}$  болған кездегі судың жылдамдығының өзгерісі мен қалақша бойындағы қысымның таралуы 6, 7 суреттерде көрсетілген. Судың қалақшаны ағып өткен кезінде пайда болған құйын мен кавитация процессінің аз екені байқалады. Судың жылдамдығы 1 м/с-тан 1.78 м/с-қа дейін артты. Қысымның қалақша бойында таралуы 196-197 кПа аралығында болды.

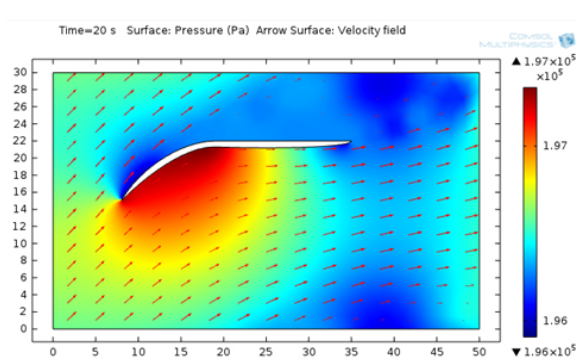
#### Қалақшаның орналасу бұрышы $30^{\circ}$ болған жағдай

Қалақшаның орналасу бұрышын  $30^{\circ}$  деп алған кездегі судың жылдамдығының қозғалысы 8 суретте бейнеленген. Судың қалақшаны ағып өткен кезінде құйын мен кавитация процессін артқаның көреміз. Ол өз кезегінде гидротурбина да дірілді арттырып, қалақшаның тозуына алып келеді [6]. Қалақшаның бұрышы  $30^{\circ}$  болған жағдайдағы қысымның таралуы 9 суретте көрсетілген. Бұл суретте қысымның ең жоғарғы шегі 199 килопаскальға дейін жеткені байқалады.

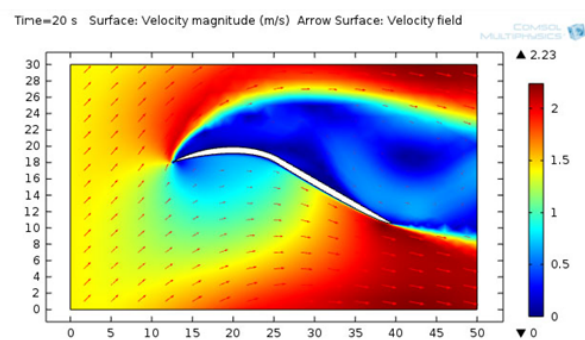
#### Қалақшаның орналасу бұрышы $45^{\circ}$ болған жағдай



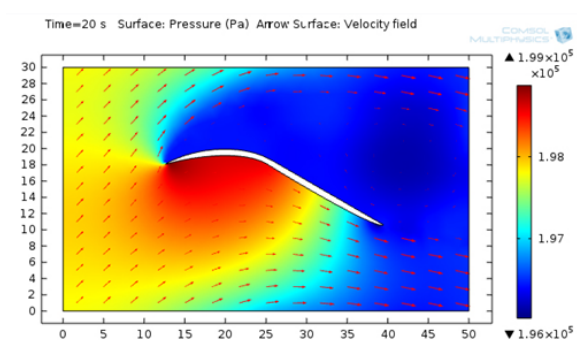
6 сурет – Судың жылдамдығының өзгерісі



7 сурет – Қысымның таралуы

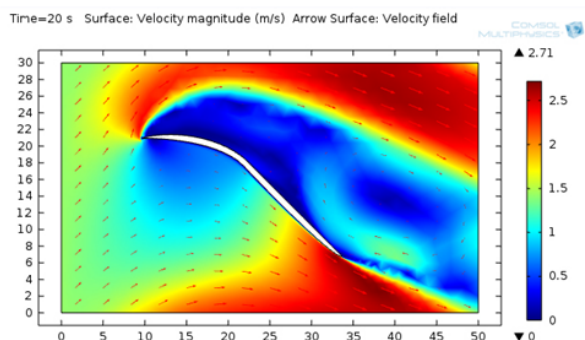


8 сурет – Судың жылдамдығының өзгерісі

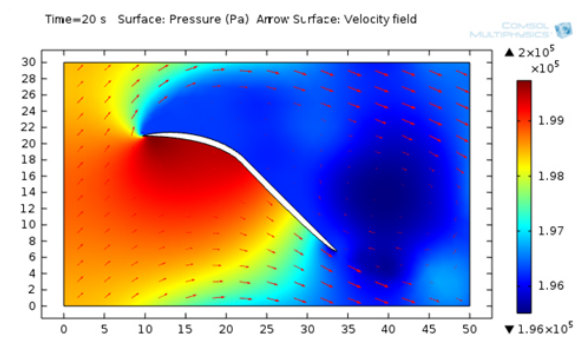


9 сурет – Қысымның таралуы

Қалақшаның бұрышын  $45^0$  деп қарастырған кездегі судың жылдамдығының қозғалысы 10 суретте көрсетілген. Бұл суретте қалақша бойындағы құйын мен кавитация процесінің максималды шегіне жеткені бейнеленген. Ол өз кезегінде гидротурбинаның жұмыс істеуіне кері әсерін тигізеді [6]. Судың жылдамдығының өзгерісі 2.71 м/с-қа дейін артқаны көрсетілген. Судың жылдамдығы қалақша бойында тұрақсыз екеніне байқалады. Қалақшанының бұрышын  $45^0$  деп берген кездегі қысымның таралуы 11 суретте көрсетілген. Қысымның ең жоғарғы шегі 200 килопаскальға дейін жетті.



10 сурет – Судың жылдамдығының өзгерісі



v11 сурет – Қысымның таралуы

Қалақша бойындағы қысымдардың таралуы 196 -200 кПа аралығында болды. Салыстырмалы түрде қалақша бойына түсетін қысымдар айтарлықтай өзгермеген соң, қалақшаны көтеруші күштіңде әсері аса қатты өзгермейді. Қорыта келгенде, қарасты-

рылған қалақша бұрыштарының ішінен  $0^0$  болған жағдай тиімді деп табылды. Қалақшаның орналасу бұрышы  $0^0$  болған жағдайда, қалақша бойында құйын мен кавитация процесі басқа орналасу бұрыштары мен салыстырғанда төмен екені байқалды. Сол себептен қалақшалардың кавитация процесінен зақымдануы азаяды. Соған байланысты гидротурбинаның жұмыс жасау уақыты да артады. Қалақша бұрышының  $0^0$  болған жағдайы гидротурбина роторына орналастырылып (12 сурет), сол бойынша гидротурбинада тәжірибелік зерттеулер жүргізілді (1 кесте).

### Қалақша қалыңдығын анықтау

Қорыта айтар болсақ, гидротурбина қалақшаларының саны артқан сайын қалақша қалыңдығы азая түседі. Егер гидротурбина роторында 12 қалақша болатын болса, онда қалақшалар қалыңдығы 2,4 мм болады. Ал егер 8 қалақша болса, онда қалақша қалыңдығы 2,5 мм тең, ал қалақша саны 6 болған жағдайда, онда қалақша қалыңдығы 2,8 мм болады екен. Гидротурбинаға 6 қалақша орналастырсақ, онда гидротурбина роторының айналымы минутына 110-115 айналым аралығында болады. Егер 9 қалақша болса, онда гидротурбина роторының айналымы минутына 155 айналымға дейін артады. Қалақша саны 12 болған жағдайда гидротурбина роторының айналымы 120-ға дейін төмендейді. Қалақша санын шексіз арттырған жағдайда, гидротурбинадан судың ағып өтуі кезінде кедергі туып, ротордың айналымына кері әсерін тигізеді. Бұдан байқайтынымыз қалақша саны 9 болған жағдай ең тиімді болып саналады. Гидротурбина роторының бойындағы қалақшалар 12 суретте көрсетілген.

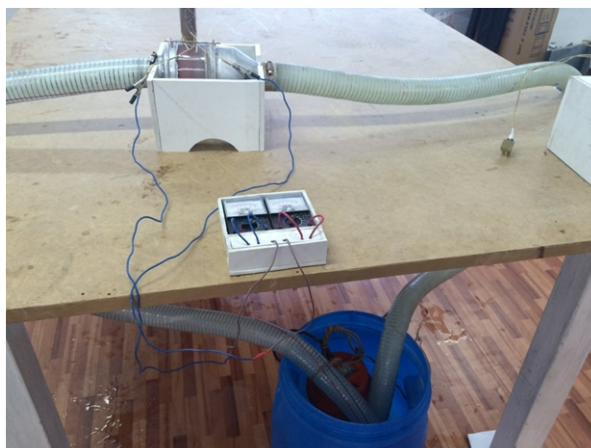


12 сурет – Гидротурбина роторының бойындығы қалақшалардың жалпы түрі

### Гидротурбинада тәжірибелік зерттеулер жүргізу

Тәжірибелік қондырғы құбырдан, су қоймадан, бір бағыттағы ағыс гидротурбинасынан, генератор орамынан, сорғыдан, судың арыны мен шығының өзгертетін ілмекті арматурадан, гидротурбина роторының айналымын есептейтін мультиметрден, электр тоғының күшін өлшейтін амперметрден және кернеуді өлшейтін тестер аспаптарынан тұрады. Тәжірибелік қондырғы 13 суретте көрсетілген.





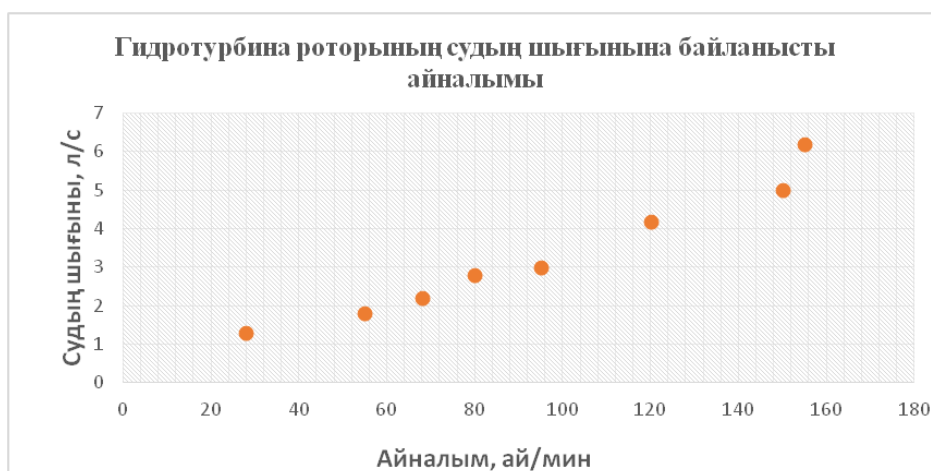
13 сурет – Зерттеу жүргізіп жатқан кездегі тәжірибелік қондырғы

Бір бағыттағы ағыс гидротурбинында жүргізілген тәжірибелік зерттеулердің қорытындысы 1 кестеде көрсетілген.

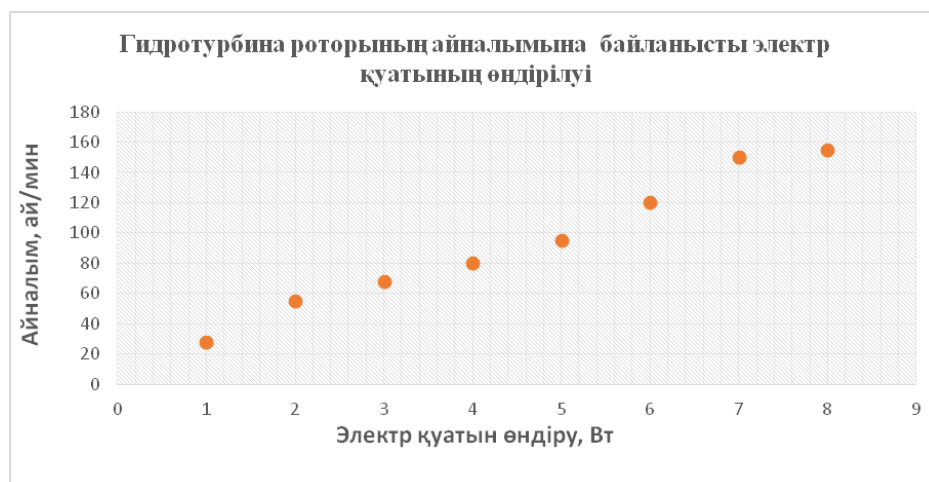
№	Судың шығыны, л/с	Гидротурбина роторының минуттағы айналымы	Электр қуатының өндірілуі, Вт
1	1.3	28	0.5
2	1.8	55	0.7
3	2.2	68	1.4
4	2.8	80	4.5
5	3	95	5
6	4.2	120	6.2
7	5	150	8
8	6.2	155	8.1

1 кесте – Судың шығынына байланысты гидротурбинаның көрсеткіші

Судың шығынының өзгерісіне байланысты бір бағыттағы ағыс гидротурбинының айналым саны мен қанша электр қуатын өндіретіні 14, 15 суреттерде көрсетілген.



14 сурет – Гидротурбина роторының судың шығынына байланысты айналымы



**15 сурет** – Гидротурбина роторының айналымына байланысты электр қуатының өндірілуі

Тәжірибелік зерттеу көрсеткендей бір бағыттағы ағыс гидротурбинасы судың шығынының өзгерісінің барлық ауқымында жұмыс жасайды. Сорғы суды су қоймадан сорып, құбыр арқылы гидротурбинаға береді. Судың ағысының арқасында гидротурбина роторы айналып, гидротурбинадан өткен су құбыр арқылы қайта су қоймаға беріледі.

### Қорытынды

Бұл мақалада бөгетсіз ГЭС-терде қолданылатын бір бағыттағы ағыс гидротурбинасының электр қуатын өндіруін арттыру мақсатында теориялық және тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Теориялық зерттеулер нәтижесі бойынша гидротурбина роторына орналастырылатын қалақшалардың ең тиімді пішіні COMSOL Multiphysics бағдарламасында анықталынды. Тиімді деп таңдалған қалақшаны  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  аралықтарында өзгерте отырып, орналасу бұрышына сәйкес оның бойындағы судың жылдамдығының өзгерісі, судың қалақшаға түсіретін қысымы зерттелінді. Зерттеу нәтижесінде ең тиімді деп саналатын қалақшаның орналасу бұрышы анықталды, су қалақшаны ағып өткен кезінде құйын және кавитация процесі пайда болатындығына көз жеткізілді. Гидротурбина роторына орналастырылатын қалақшалардың ең тиімді саны есептелініп, сол бойынша қалақшалардың қалыңдықтары анықталды. Бір бағыттағы ағыс гидротурбинасында тәжірибелік зерттеулер академик Ш.Ш. Шокин атындағы ҚазҒЗ энергетика институтының гидротехникалық құрылыстар мен су электр станциясы зертханасында жүргізілді. Судың шығының ілмекті арматура арқылы өзгерте отырып, гидротурбина роторының минутына қанша айналым жасайтыны мультиметр аспабының көмегімен анықталды. Гидротурбина роторының минуттағы айналымы бойынша қанша электр қуатын өндіретіні Ом заңы арқылы есептелінді. Алынған нәтижелер бойынша "Гидроагрегат" атты өнертабысқа Қазақстан Республикасының инновациялық патентін алуға арналған өтінім жасалды [7].

### Әдебиеттер тізімі

- [1] Барлит В.В. Гидравлические турбины. Киев.: Вища школа, 1977. 390 с.
- [2] COMSOL Multiphysics User's Guide May 2012. 1292 p.

- [3] *Turbulent Flows by Stephen B. Pope* Cambridge University Press: Cornell University, 2000. 773 p.
- [4] *Куашилинг Фолькер* Системы возобновляемых источников энергии: учебник / Пер. с немецкого. - Астана: Фолиант, 2013. 432 с.
- [5] *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газов. 6-е изд. М.: Наука, 1987. 840 с.
- [6] *Пылаев Н.И., Эдель Ю.У.* Кавитация в гидротурбинах. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
- [7] *Кошумбаев М.Б., Босинов Д.Ж. и др.* Заявка на инновационный патент № 2015/0277.1. Гидроагрегат. Дата регистрации: 26 февраля 2015 года.

### References

- [1] *Barlit V.V.* Gidravlicheskie turbiny. Kiev.: Vishcha shkola, 1977. 390 s.
- [2] *COMSOL Multiphysics User's Guide* May 2012. 1292 p.
- [3] *Turbulent Flows by Stephen B. Pope* Cambridge University Press: Cornell University, 2000. 773 p.
- [4] *Volker Quaschnig* Системы возобновляемых источников энергии. Astana: Foliant, 2013. 432 s.
- [5] *Loitsyanskiy, L.G.* Mehanika zhidkosti i gazov, 6-e izd. M.: Nauka, 1987. 840 s.
- [6] *Pylaev N.I., Edel Ju.U.* Kavitatsiya v gidroturbinax. M.: Mashinastroenie, 1974. 256 s.
- [7] *Koshumbaev M.B., Bossinov D.Zh. i dr.* Zayavka na innovatsionnyi patent № 2015/0277.1. Gidroagregat. Data registratsii: 26 fevralya 2015 goda.