



ОБОЗОВ А.ДЖ., МЕДЕРОВ Т.Т., ОРАЗБАЕВ К.Н.

¹ИМ и А НАН КР, Бишкек, Кыргызская Республика,
²КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика
³Жезказганский университет, Жезказган, Казахстан

OBOZOV A.DZH., MEDEROV T.T., ORAZBAEV K.N.

¹IMA NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic
²KSTU n.a. I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic
³Zhezkazgan University, Zhezkazgan, Kazahstan
Obozov-a@mail.ru mtt-kg@mail.ru

К ОДНОЙ ИЗ ЗАДАЧ СОЗДАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОДОВОРОТНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

TO ONE OF THE PROBLEMS OF CREATING GRAVITATIONAL WATER VORTEX HYDROPOWER PLANTS

Бул жумушта гравитациялык суукуюн гидроэлектростанцияларды пайдалануунун перспективаларына баа берүү маселелери талкууланат. Гидротурбиналардын конструкцияларына талдоо жүргүзүлүп, алардын артыкчылыктары жана кемчиликтери, аларды турбиналык камерага орнотуу ыкмалары, ошондой эле эксперименталдык түрдө аныкталган эффективдүүлүктөрү каралат. Гидравликалык турбиналардын ар түрдүү типтерин үч өлчөмдүү моделдештирүүнүн натыйжалары келтирилген. Гидротурбинанын кинематикалык параметрлери менен кубаттуулугунун ортосундагы байланышты орнотуу менен турбинанын калакчаларынын өз ара аракетинин кинематикасы каралат.

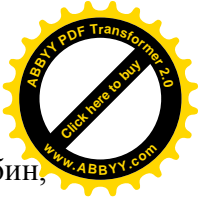
Өзөк сөздөр: гидротурбина, гидроэлектростанция, микроГЭС, суукуюн, воронка, кубаттуулук, иштеп чыгаруу, жүктөм, моделдөө, кинематика, ылдамдык үч бурчтугу.

В данной работе рассматриваются вопросы оценки перспектив использования гравитационных водоворотных гидроэлектростанций. Проводится анализ конструкций гидравлических турбин, рассматриваются их преимущества и недостатки, способы их установки в камере турбины, а также экспериментального определения коэффициента полезного действия. Излагаются результаты трехмерного моделирования различных типов гидравлических турбин. Рассматривается кинематика взаимодействия лопастей турбины, с установлением связи кинематических параметров с мощностью гидравлических турбины.

Ключевые слова: гидротурбина, гидроэлектростанция, микроГЭС, водоворот, воронка, мощность, выработка, нагрузка, моделирование, кинематика, треугольник скоростей.

This paper discusses the issues of assessing the prospects for the use of gravitational water vortex hydroelectric power plants. The analysis of the designs of hydraulic turbines is carried out, their advantages and disadvantages are considered, the methods of their installation in the turbine chamber, as well as the experimental determination of the efficiency. The results of three-dimensional modeling of various types of hydraulic turbines are presented. The kinematics of the interaction of the turbine blades is considered, with the establishment of a connection between the kinematic parameters and the power of the hydraulic turbine.

Keywords: hydro turbine, hydroelectric power station, micro hydroelectric power station, water vortex, funnel, power, output, load, modeling, kinematics, velocity triangle.



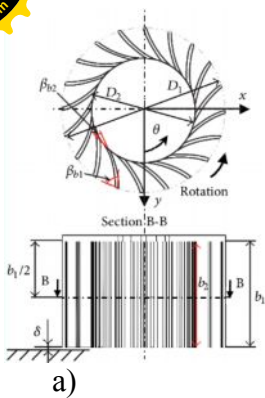
Целью данной работы является сравнительный анализ конструкций гидротурбин, используемых в гравитационных водоворотных гидроэлектростанциях. Разработка и обоснование модели гидротурбины и на её основе изучение особенностей взаимодействия водного потока с лопастями.

Гидроэлектростанция может служить и в больших, и в централизованных, и в малых, изолированных сетях. Малые же микроГЭСы являются эффективным вариантом для электрификации сельской местности [1][2]. Благодаря своим возможностям быстрого реагирования на изменения нагрузки, пиковой мощности ГЭС может играть важную роль в обеспечении надежного электроснабжения, использоваться для уменьшения частоты пусков и остановок тепловых электростанций, снижать нагрузку на них, тем самым снижая выбросы углерода [1]. Кроме того, ГЭС могут помочь решить проблемы интеграции генерирующих станций, работающих на возобновляемых источниках энергии, как солнце, ветер и др.

Кыргызская республика вырабатывает электрическую энергию преимущественно за счет ГЭС (около 95%), и обладает огромным гидроэнергетическим потенциалом, однако на сегодняшний день освоено всего десятая доля этого потенциала [2]. Поэтому исследования в области технологии генерации за счет гидроэнергии являются весьма приоритетными. В особенности за счет использования энергии малых водотоков, для электроснабжения автономных малоэнергоемких потребителей.

Одним из наиболее привлекательных типов таких микроГЭС являются низкопотенциальные гравитационные установки [3]. Важнейшим компонентом гравитационных водоворотных гидроэлектростанций (ГВВГЭС) является гидротурбина. По данным проведенного анализа, в мире существуют довольно большое количество исследований направленных на разработку методов расчета и оптимизации гидротурбин, для её повышения эффективности. Концепция ГВВГЭС еще не установлена, поэтому разные исследователи используют различные типы вихревых гидротурбин для своих исследований. В одном из самых ранних публикациях о подобных установках в 2013 году, исследователем Марианом Ж.М. и др. проведены эксперименты гидроэнергетической установки с использованием трех разных гидротурбин и установлением их на разной высоте в коническом бассейне. По их мнению, максимальная работоспособность может быть получена, если гидротурбина установлена на выходе из бассейна [4]. Однако профиль лопасти не учитывался при анализе эффективности турбин. В работе Сритрам и др. удалось доказать, что установка с алюминиевой турбиной имеет более высокий КПД при различных нагрузках и расходах по сравнению со стальной турбиной [5]. В 2016 году Кристин Паувер и др. обнаружили, что такие параметры как высота входа и расход, оказывают значительное влияние на эффективность, когда в водоворотной электростанции используются гидротурбины с вертикальной осью и различными размерами лопастей. Всего было изготовлено девять конфигураций турбин с разными размерами и количеством лопастей. Общий КПД водоворотной установки варьировался от 15,1% до 25,36% в зависимости от геометрии бассейна, объемного расхода, положения турбины, формы и количества лопастей [6]. Ясуики Ниши и Теруми Инагаки в своем исследовании предложили водоворотную гидротурбину представленную на рис. 1а. Данное рабочее колесо имеет центробежную форму, которая отличается от формы осевых лопастных рабочих колес [7]. Максимальная экспериментально определенная КПД гидротурбины составляет приблизительно 35,4%.

На рис.1б. представлены гидротурбины спроектированные и собранные для исследования и анализа водоворотных электростанций в Непале [8]. Были разработаны два рабочих колеса, лопасти которых были изготовлены под различными углами. Конструкция лопасти сконструирована таким образом, что она немного изогнута, образуя угол с вертикалью. Угол входа составляет 105° от горизонтальной линии, а угол выхода изгибается на 140° от горизонтальной линии. Максимальная экспериментально определенная КПД первой гидротурбины составила приблизительно 29,02%, а второй гидротурбины 48,57%.



б)

Рис.1. Рабочие колёса: а) центробежной формы; б) осевой

На рис.2. представлены гидротурбины Цотлёттера для гравитационных водоворотных гидроэлектростанций. Слева показана действующая высокоэффективная как утверждает автор гидротурбина, изготовленная из нержавеющей стали с содержанием хрома, обладающая стойкостью к коррозии (INOX). Справа представлены чертежи радиальной, спиральной и осевой гидротурбины. Во всех конструкциях гидротурбин Цотлёттер предлагает сравнительно простую и чрезвычайно прочную концепцию гидротурбины, которая обеспечивает до 80% КПД гидротурбины при малых напорах от 0,7 до 3 м [9]. Диапазон мощности составляет от 0,2 до 500 кВт. Кроме того, гидротурбина не представляет опасности для рыб из-за своей низкой скорости.

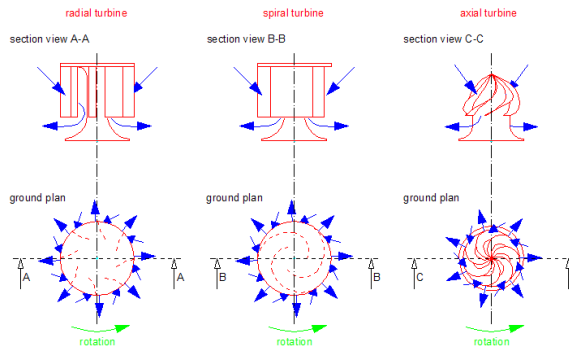


Рис.2. Гидротурбины Цотлёттера

Представляется весьма интересным двухступенчатая водоворотная гидротурбина, собранная в коническом бассейне с конфигурацией профиля лопасти Савониуса рис.3. Установка состоит из двух рабочих колёс, каждое из которых имеет 4 лопасти, и собственный вал расположенный один в другом с точки зрения независимой выработки энергии [10]. Сильная тангенциальная скорость, максимальное значение гидравлического напора около нижнего центрального отверстия является основным фактором выработки энергии на нижней ступени.

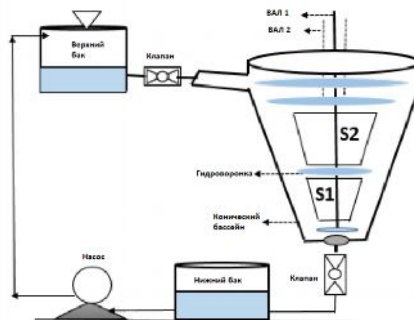


Рис.3. Двухступенчатая водоворотная гидротурбина

На рис.4 представлена гравитационная водоворотная гидротурбина, предложенная Пакистанскими исследователями А. Шарифом и др. [11]. Рабочее колесо представляет собой конфигурацию обратного конуса с пятью лопастями изогнутой формы. Как утверждают авторы данная гидротурбина взаимодействует с гидроворонкой как по горизонтали, так и по вертикали и увеличивают выходную мощность и эффективность. Как показано на кривой зависимости на средних оборотах предложенная водоворотная гидротурбина показывает максимальный КПД 52,64%.

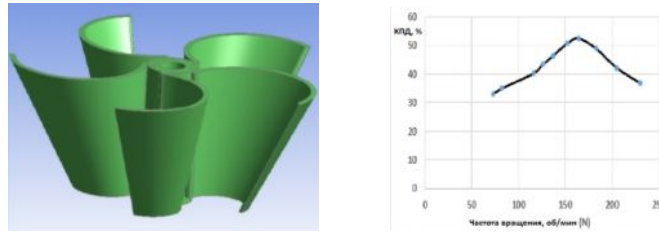


Рис.4. Гравитационная водоворотная гидротурбина и кривая зависимости КПД от частоты вращения

Гравитационная водоворотная гидротурбина ARVO представлена на рис.5. Рабочее колесо сконструировано таким образом, чтобы иметь полый вал с коническими лопастями высотой 1 м, равномерно расположенными по окружности, чтобы иметь форму перевернутого конуса, это приводит к увеличению активной площади лопаток турбины, которая подвергается воздействию движущейся воды. Максимальная экспериментально определенная КПД установки составила 28% [12].

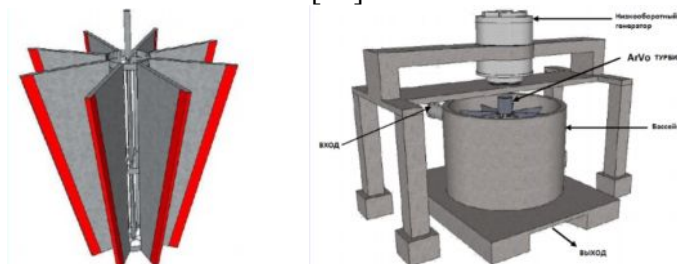


Рис.5. Водоворотная гидротурбина ARVO

Бельгийская компания Turbulent предлагает водоворотную микроГЭС с погружным гидроагрегатом рис.6. Водоворотные гидротурбины Turbulent изготавливаются безопасными для жизни рыб, оптимизированными для потока лопастями, низкой скоростью вращения и уровнем шума. Основной блок рассчитан на работу более 25 лет. Погружной редуктор и генератор с торцевыми уплотнениями, вторичная система уплотнения с многослойной защитой от пресной и солоноватой воды и песка, разработанная для продолжительного использования в суровых условиях. Все детали ротора и корпуса изготовлены из нержавеющей стали, используемой в пищевой промышленности. Оснащен необслуживаемым индукционным генератором европейских производителей. Выпускаются на мощности от 5 до 70 кВт, на напоры от 1 до 4.4 м, при расходах воды от 0.7 до 4 м³/с [13].

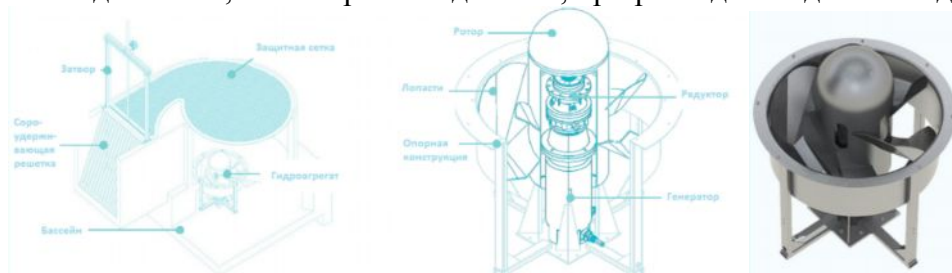


Рис.6. Водоворотный гидроагрегат Turbulent

Тайландскими учеными Сритрам и Сунтиваракорн из университета Кхон Каен было проведено исследование по определению оптимального количества лопастей осевой

водооборотной гидротурбины. Были проведены лабораторные эксперименты, для определения эффективности гидравлических турбины начиная с 2-х до 7-и лопастей, чтобы найти наиболее подходящее количество лопастей, и результат показал, что турбина с 5-ю лопастями является наиболее эффективной, потому что она дает самый высокий крутящий момент от воздействия потока воды [14]. Наблюдение за потоком воды в бассейне, воздействующего на лопасти, показало, что водоворот центробежно циркулирует в бассейне над отверстием на дне, и как показано на лопасти гидротурбины воздействует центробежный поток воды. Было обнаружено, что при увеличении количества лопастей до 5 лопастей площадь поверхности, контактирующей с водой, была больше, что приводило к более высокому крутящему моменту. Но когда было 6 или 7 лопастей, расстояние между лопастями было меньше, что уменьшало влияние потока воды на лопасти. Более того, поток воды через отверстие создавал сопротивление движению следующей последовательно включенной лопасти, что приводило к сопротивлению водоворота и, следовательно, уменьшению крутящего момента, создаваемого турбиной, как показано на рис 7.

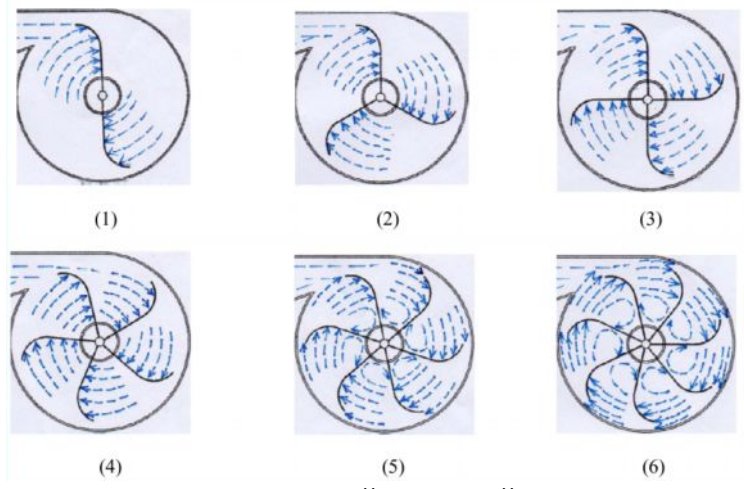


Рис.7. Эскизы направления воды, воздействующей на лопасти гидротурбин: (1) 2 лопасти, (2) 3 лопасти, (3) 4 лопасти, (4) 5 лопастей, (5) 6 лопастей, (6) 7 лопастей

Другой группой ученых из того же университета было проведено исследование по увеличению эффективности водооборотной гидротурбины посредством установки на их лопостях перегородки рис.8. Они использовали наиболее эффективное согласно исследованиям [14] осевое рабочее колесо с 5-ю лопастями. Для того чтобы найти наиболее подходящие размеры и пропорции перегородок в исследовании использовали вычислительную гидродинамику для разработки перегородки для лопастей. Результаты показали что рабочее колесо с 50% покрытием торцов лопастей перегородкой дает наиболее высокое значение момента в среднем на 10.25% больше, чем такое же рабочее колесо с 5-ю лопастями но без перегородки [15].

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Момент [Нм]	1.53	5.28	8.71	7.26	4.55
Пропрции перегородок (%)	0	25	50	75	100

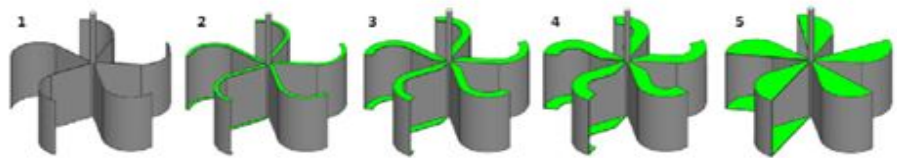


Рис.8. Модели гидротурбин с перегородками и их крутящие моменты

Таким образом, проведенный анализ водооборотных гидротурбин позволил их разделить по формам, способу взаимодействия с потоком воды, способу установки и

размещения гидротурбины, а также по их эффективности, что дает возможность осуществить сравнение и предварительный выбор.

По результатам проведенного анализа нами были спроектированы с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС 3D v.15.2, а затем изготовлены три конструкции водоворотных гидротурбин рис.9. Все три типа гидротурбин осевые 5-и лопастные, лопасти изготовлены из алюминия. Первая гидротурбина с плоскими лопастями (модель 1), вторая с цилиндрическими лопастями (модель 2) и третья тоже с цилиндрическими лопастями, но с зазором между валом и ребром лопасти по типу турбины Савониуса (модель 3), чертеж лопасти показан на рис.10. Во время проектирования гидротурбин определены различные переменные, такие как длина и высота, толщина, радиус изгиба лопасти, а также угол входа в горизонтальной плоскости, количество лопастей рабочего колеса, внутренний и внешний диаметр рабочего колеса. В таблице 1 даны основные параметры всех трех водоворотных гидротурбин.

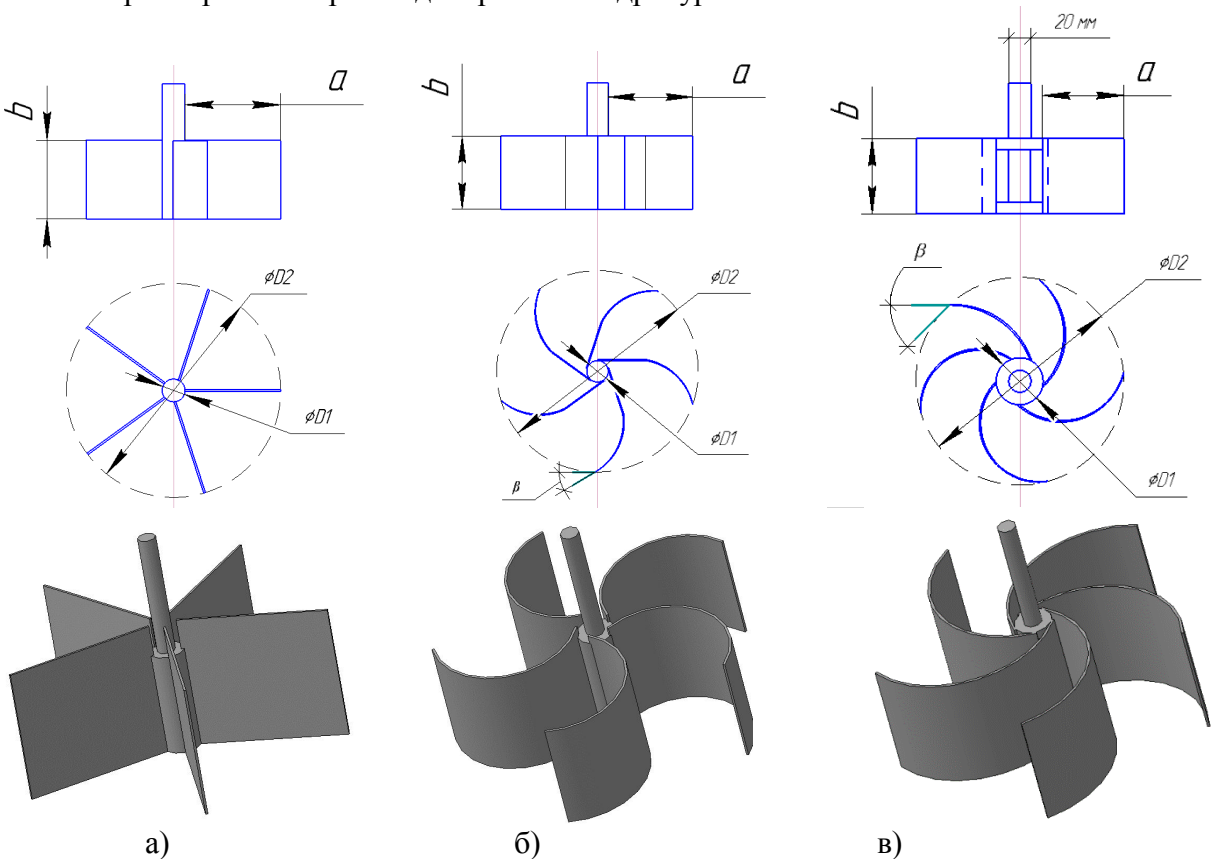


Рис.9. Чертеж и 3D модель осевой водоворотной гидротурбины: а) плоской лопастью; б) цилиндрической лопастью; в) цилиндрической лопастью с зазором

Таблица 1 – Основные геометрические параметры моделей гидротурбин

	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Внутренний диаметр, $D1$	20 мм	20 мм	30 мм
Внешний диаметр, $D2$	300 мм	300 мм	300 мм
Длина лопасти, a	140 мм	140 мм	135 мм
Высота лопасти, b	120 мм	120 мм	120 мм
Толщина лопасти, d	2,5 мм	2,5 мм	2,5 мм
Радиус изгиба лопасти, R	-	65 мм	65 мм

Угол входа, β	-	30°	45°
Количество лопастей, Z	5	5	5

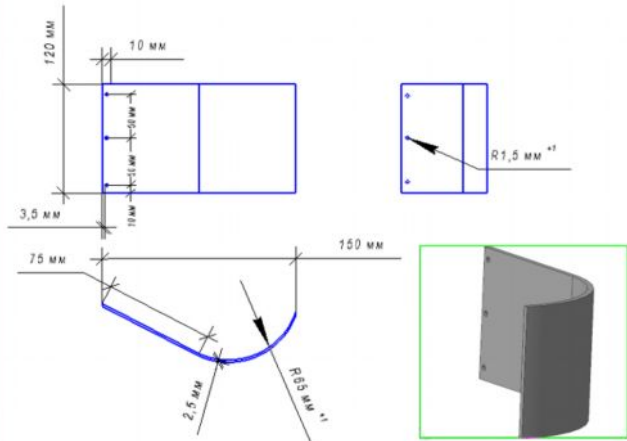


Рис. 10. Геометрические параметры лопасти

На производительность гидротурбины может влиять множество факторов. Однако определяющее значение предполагается имеют углы входа и выхода лопастей. Поэтому в первую очередь необходима рассмотреть кинематику потока в рабочем колесе, построить треугольники скоростей на входе и выходе из лопастей. На рис.11а изображена обтекание потока водоворотной гидротурбины, где видно, что сначала на входе поток движется от периферии к центру, а затем на выходе в осевом направлении, и на лопасти показана осредненная линия тока. На рис.11б,в показаны треугольники скоростей на входе и выходе лопасти водоворотной гидротурбины, где как известно u_1, u_2 окружная скорость, w_1 и w_2 относительная скорость, v_1 и v_2 абсолютная скорость на входе и выходе лопасти. V_u и V_r окружная (тангенциальная) и радиальная составляющие абсолютной скорости. Векторы абсолютной скорости при входе и на выходе лопасти определяются векторной суммой:

$$\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1; \quad (1)$$

$$\vec{v}_2 = \vec{u}_2 + \vec{w}_2; \quad (2)$$

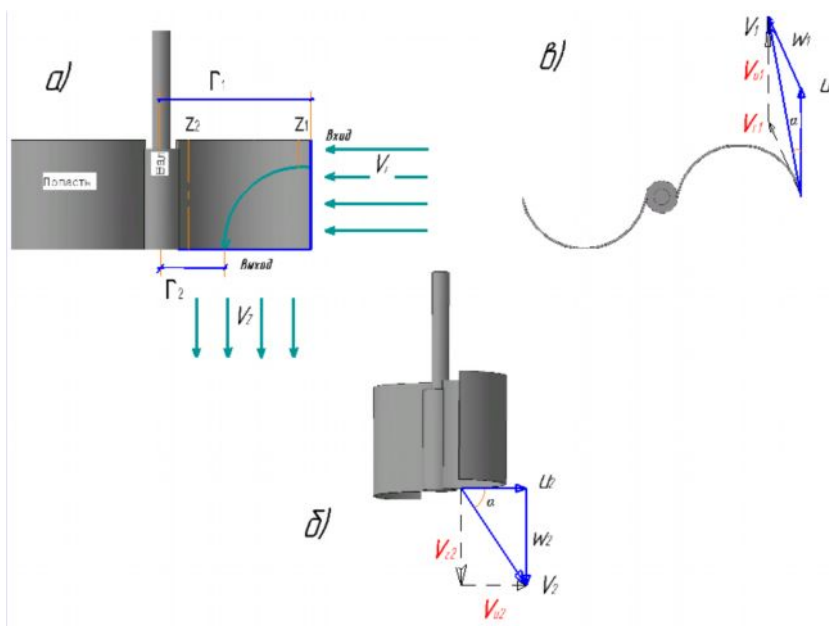
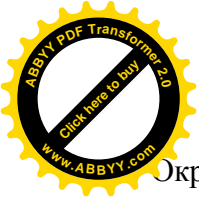


Рис.11. Треугольники скоростей, построенные на лопасти водоворотной гидротурбины.



Окружная скорость u_1 определяется формулой

$$u_1 = \frac{2\pi r_1 n}{60}$$

Абсолютная скорость на входе в рабочее колесо представляется векторной суммой

$$v_1 = V_{u1} + V_{r1}$$

где

$$V_{u1} = V_0 \cos \alpha \quad (3)$$

V_0 – средняя скорость потока в бассейне,

$$V_{r1} = \frac{Q}{2\pi r_1 b}$$

b – высота лопасти. Зная v_1 и u_1 по (1), определим w_1 следующим образом

$$\vec{w}_1 = \vec{v}_1 - \vec{u}_1;$$

Аналогично определяем скорости на выходе из лопасти.

Зная момент и задавая угловую скорость рабочего колеса, можно определить развиваемую им мощность

$$N_{\text{рк}} = M \omega \quad (4)$$

Здесь момент будет

$$M = \frac{\rho Q}{2\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2)$$

где

$$\Gamma_1 = 2\pi r_1 V_{1u}$$

$$\Gamma_2 = 2\pi r_2 V_{2u}$$

Тогда

$$M = \rho Q (r_1 V_{1u} - r_2 V_{2u})$$

Подставив в (4), получим

$$N_{\text{рк}} = \rho Q (r_1 V_{1u} - r_2 V_{2u}) \omega \quad (5)$$

где

$$u_1 = r_1 \omega$$

$$u_2 = r_2 \omega$$

$$Q_m = \rho Q$$

Q_m – это массовый расход. Тогда (5) можно записать следующем виде

$$N_{\text{рк}} = Q_m (u_1 V_{1u} - u_2 V_{2u}) \quad (6)$$

Таким образом выведенное уравнение дает связь между мощностью и кинематическими параметрами в гидротурбине.

Если проанализировать уравнение (6), то можно сделать вывод о том, что при одном и том же значении расхода Q_m поступающем в рабочие колеса мощности $N_{\text{рк}}$ будут выше, чем больше значения скоростей на входных кромках лопастей, или если значения скоростей меньше на выходе из лопастей.

Тогда применив результаты анализа в предложенных нами моделях водоворотных гидротурбин, можно сказать, что во всех трех моделях гидротурбин скорости на выходе будут почти одинаковыми. На входе же у модели 1 с плоскими лопастями скорости будут меньше по сравнению с моделями 2 и 3 поскольку относительная скорость, зависящая от формы лопасти будет меньше, кроме того, не обеспечивается безударный вход потока. На входных кромках модели 2 с цилиндрической лопастью, и модели 3 цилиндрической лопастью и с зазором скорости будут примерно одинаковыми. А зазор, оставленный между валом и ребром в модели 3 для повышения эффективности как оказалось не влияет на скорости т.к. выход осуществляется по осевому направлению как показывает траектория движения жидкости (см. рис.11а), центральная часть гидротурбины, где имеется зазор остается в воздушном пространстве созданной гидроворонки.



Список литературы

1. Kumar, A., T. et al. 2011: Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation/Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
2. Медеров Т.Т. Результаты построения гидродинамической модели турбины микроГЭС. [Текст] / Т.Т. Медеров. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. Бишкек: 2015. - №33. - С. 273-278.
3. Медеров Т.Т. Исследование влияния расхода гидравлического потока на частоту вращения турбины водоворотной микроГЭС. [Текст]: / А.Дж. Обозов, Женишбек у К., Б.Р. Акматбеков. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – Бишкек: 2017. - №4 (44). - С. 207-212.
4. Marian G-M, Sajin T and Azzouz A 2013 Applied Mechanics and Materials 371 601-605.
5. Sritram P, Treedet W and Suntivarakorn R 2015 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering vol. 103 012018.
6. Power C, McNabola A and Coughlan P 2016 Journal of Clean Energy Technologies 4 112-119.
7. Nishi Y & Inagaki T 2017 Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine Int. J. of Rotating Machinery
8. T.R. Bajracharya, R.M. Ghimire, A.B. Timilsina Design and performance analysis of water vortex powerplant in context of Nepal, 20th International Seminar on Hydropower Plants, 14-16 November 2018, Vienna, Austria
9. [Электронный ресурс]: <http://www.zotloeterer.com> (дата обращения: 12.12.2021).
10. Taqi Ahmad Cheema et al. Performance analysis of a two-stage gravitational water vortex turbine 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 291
11. Aamer Sharif, Muftooh Ur Rehman Siddiqi and Riaz Muhammad/Novel Runner Configuration of a Gravitational Water Vortex Power Plant for Micro Hydropower Generation/Journal of Engineering and Applied Sciences
12. Aravind Venukumar, Nandakumar M., Venkateswara Rao M. and Shekhar Kumar M./Run-of-the-river micro hydroelectric power generation from artificially induced vortices/
13. [Электронный ресурс]: <https://www.turbulent.be/> (дата обращения: 12.12.2021).
14. P Sritram and R Suntivarakorn/The effects of blade number and turbine baffle plates on the efficiency of free-vortex water turbines/IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 257 (2019) 012040.
15. Wichian P and Suntivarakorn R 2016 The Effects of Turbine Baffle Plates on the Efficiency of Water Free Vortex Turbines Energy Procedia Vol.100p198–202.