

УДК: 621.224.7:621.311.214.1

*Т.Т. Медеров, mtt-kg@mail.ru,**Р.А. Акпаралиев, ruslan.akparaliev@gmail.com**Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ БИРОТОРНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ FLOWVISION

В статье представлено исследование и моделирование гидротурбины бироторной микро-ГЭС с использованием современных численных методов гидродинамики. Принцип работы данной микро-ГЭС основан на использовании двух рабочих колес, вращающихся в противоположных направлениях в одном потоке воды, что позволяет увеличить эффективность преобразования водной энергии. Отмечаются результаты численного моделирования, проведенного с использованием программного комплекса FlowVision, включая распределение скорости, направление векторов и линии тока, а также распределение давлений на лопастях гидротурбин. Подчеркивается необходимость дальнейших исследований, включая анализ гидродинамики в переходных режимах, взаимодействия двух турбин и оптимизации процессов, а также разработку надежных систем управления и безопасности. Исследование бироторной микро-ГЭС представляет собой важное направление и может способствовать развитию устойчивых, возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: микро-ГЭС; бироторная микро-ГЭС; возобновляемые источники энергии; гидротурбина; гидродинамика; численные методы; программный комплекс FlowVision; напор; расход; мощность; вычислительная гидродинамика (ВГД).

Введение

В большинстве стран уже возобновляемые источники энергии (ВИЭ) стали основным ресурсом для расширения мощностей в электроэнергетике и в настоящее время привлекают наибольшее внимание инвесторов. Средневзвешенная стоимость производства электроэнергии на новых промышленных солнечных фотоэлектрических станциях в мире снизилась на 85% за последние десять лет. Для концентрированной солнечной энергии (КСЭ) это снижение составило 68%, для наземной ветроэнергетики — 56%, а для морской ветроэнергетики — 48%. В условиях истощения и роста цен на ископаемое топливо экономические перспективы энергетики на основе ВИЭ становятся все более очевидными [1].

В Кыргызской Республике, где более 93% территории покрыто горами и множество рек извилисто протекают через ущелья, использование гидроэнергии этих малых рек считается одним из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии. По оценкам, потенциал этих рек составляет примерно 5–8 миллиардов киловатт-часов в год [2]. В исследованиях, проведенных Программой развития ООН (ПРООН) и Организацией промышленного развития ООН (ЮНИДО), было установлено, что возможно создание или восстановление от 87 до 92 малых гидроэлектростанций. По предварительным расчетам, их совокупная установленная мощность составит около 180 МВт, при этом коэффициент использования установленной мощности в среднем составит 63%. Годовой потенциал производства энергии этих объектов оценивается примерно в 1 миллиард кВт.ч, что эквивалентно 1000 ГВт.ч [3]. Строительство крупных гидроэлектростанций требует значительных временных, трудовых и финансовых затрат. В то же время создание и внедрение малых гидроэнергетических установок значительно проще и быстрее, особенно в удаленных регионах, где другие виды энергии могут быть непрактичными или экономически невыгодными. Малые и микро-ГЭС представляют собой эффективное решение для электрификации сельских территорий. Благодаря способности оперативно реагировать на изменения нагрузки пиковая мощность таких ГЭС играет важную роль в обеспечении стабильного электроснабжения. Они могут снижать частоту запусков и остановок тепловых электростанций, что уменьшает нагрузку на них и сокращает выбросы углекислого газа [4]. Также гидроэлектростанции могут способствовать решению вопросов, связанных с интеграцией источников энергии, работающих на

возобновляемых ресурсах, таких как солнечные и ветровые электростанции. В Кыргызстане вырабатывается около 15 млрд кВт.ч электроэнергии каждый год, причем потребление растет в среднем на 5–10% [5]. Рост потребления связан с тем, что в стране установлены одни из самых низких тарифов на электроэнергию для бытовых потребителей в мире. Благодаря социально ориентированным тарифам электроэнергия широко используется для отопления, что значительно увеличивает объемы ее потребления. По данным энергокомпаний, последние годы в стране фиксируются рекордные значения потребления электрической энергии за сутки в осенне-зимний период (ОЗП), и энергетическая система работает в пределах существующих мощностей [6]. Текущая ситуация указывает на острую необходимость ввода новых генерирующих мощностей. Для решения одной части задач ввода новых мощностей эффективно может быть использован потенциал малых рек. Использование энергии малых водотоков в значительной мере могут решить проблему электроснабжения маломощных потребителей, расположенных в предгорных и горных районах, тем самым повысив их социально-экономическое положение [7, 8]. По этой причине исследования в данной сфере представляют собой актуальную задачу.

Сегодня разработано и успешно используется большое разнообразие малых и микро-ГЭС для электроснабжения таких потребителей. В зависимости от условий эксплуатации они имеют разные формы и компоненты. Все они, помимо своих преимуществ, обладают и рядом недостатков, таких как громоздкость, высокая металлоемкость, значительная стоимость и т.д. В связи с этим группой исследователей из технического университета была разработана и создана микро-ГЭС бироторного типа с совершенно новым дизайном, избавленная от упомянутых недостатков, а также получен ряд патентов на изобретение. Были проведены лабораторные и натурные эксперименты, в результате которых были доказаны верности основных положений концепции бироторных микро-ГЭС и их высокой эффективности. Принцип работы бироторной микро-ГЭС заключается в использовании двух рабочих колес на одной оси, расположенных последовательно и вращающихся в противоположных направлениях в одном потоке воды. Это техническое решение позволяет вращать и статор генератора, снизить размеры и частоту вращения генератора, что в конечном итоге повышает эффективность преобразования водной энергии и делает микро-ГЭС более экономически выгодной.

Создание бироторной микро-ГЭС представляет собой важное техническое достижение, тем не менее следует отметить, что эта технология находится на стадии развития и требует дальнейших научных исследований и оптимизации. Необходимо провести более глубокое научное исследование, в рамках которого будут изучены различные аспекты, оптимизированы процессы и улучшены характеристики устройства. Главными направлениями исследования следует считать анализ гидродинамики в потоке, изучение взаимодействия двух турбин в одном гидравлическом потоке, а также анализ переходных процессов в системе. Первоначально необходимо более подробно исследовать гидродинамические особенности данного процесса, включая распределение скоростей, давления и потери энергии в гидравлическом потоке. Это позволит оптимизировать форму и параметры рабочих колес, а также выбрать оптимальный режим работы для достижения максимальной эффективности. Далее необходимо более подробно изучить взаимодействие двух турбин, включая анализ вихревых явлений, уделить внимание исследованию переходных процессов в системе, таких как пуск и остановка микро-ГЭС, а также реакция оборудования на изменения в гидравлических условиях, что позволит создать надежные и эффективные системы управления и безопасности для таких станций. Это будет способствовать более эффективной интеграции микро-ГЭС в существующие энергетические сети и гарантировать стабильность электроснабжения.

Постановка задачи

- Определение распределения скорости и давления внутри бироторной гидротурбины как в стационарном, так и в переходных режимах.
- Оптимизация положения профиля лопастей на рабочих колесах.
- Моделирование турбулентного вязкого движения несжимаемой жидкости между лопастями двух рабочих колес.
- Определение эффекта взаимодействия между двумя рабочими колесами и их воздействия на гидравлический поток.
- Расчет общей производительности бироторной гидротурбины, включая оценку КПД как в стационарном, так и в переходных режимах.
- Исследование гидродинамических потерь в турбине как в стационарных, так и в переходных режимах.
- Оценка динамического поведения системы при изменении нагрузки или других внешних воздействиях.

Метод моделирования

Использовать численные методы для решения уравнений Навье-Стокса, адаптированные к гидродинамике турбин, включая учет вращения рабочих колес и межтурбинного расстояния. Для учета переходных процессов использовать методы трансientного моделирования, учитывая изменения параметров со временем. Программа FlowVision обладает необходимыми инструментами для проведения такого моделирования.

Основные физические процессы, уравнения и обозначения

В программном комплексе FlowVision реализованы математические модели физических процессов, которые задаются и настраиваются в окнах свойств различных элементов деревьев Препроцессора и Решателя. Физические процессы, протекающие в непрерывной *Фазе*, активируются в свойствах элемента *Препроцессор > Фазы > Фаза №i* (непрерывная) > *Физические процессы*. Это: Движение; Теплопередача; Массообмен; Турбулентность; Фазовый перенос; Излучение.

Физические процессы, протекающие в дисперсной *Фазе* типа *Частицы*, активируются в свойствах элемента *Препроцессор > Фазы > Фаза №i* (дисперсная типа Частицы) > *Физические процессы*. Это: Теплопередача; Фазовый перенос; Движение; Массоперенос.

Физический процесс *Движение* присутствует в позиции *Движение* в свойствах элемента *Препроцессор > Фазы > Фаза № i > Физические процессы*.

Описание модели течения, основанное на уравнении Навье-Стокса:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(pV) = 0. \quad (1)$$

Уравнение количества движения:

$$\frac{\partial pV}{\partial t} + \nabla(pV \otimes V) = -\nabla p + \nabla \cdot \hat{t}_{eff} - DV - \hat{D}V + F + F_L + F_{user} \quad (2)$$

$$\hat{t}_{eff} = (\mu + \mu_t) \left(2\hat{S} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot V)\hat{I} \right) \quad (3)$$

$$\hat{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$D = \left(\frac{\mu}{k_d} + C \frac{1}{2} p |V| \right) \varphi_c \quad (5)$$

$$F = (p - p_g)g - p(2\omega \times V + \omega \times \omega \times r). \quad (6)$$

Здесь:

D — коэффициент, характеризующий изотропное сопротивление.

$D \square$ — матрица коэффициентов анизотропного сопротивления.

k_d — проницаемость твердого каркаса (неподвижной матрицы).

φ_c — относительный объем, занимаемый жидкостью в ячейке (объем пор).

F_L — сила Лоренца, действующая на единицу объема среды со стороны электромагнитного поля.

F_{user} — объемная сила, приложенная пользователем.

I — единичный тензор.

ω — угловая скорость вращающейся подобласти.

r — радиус-вектор, исходящий из оси вращения.

Уравнения (1) и (2) вместе обычно называются уравнениями Навье-Стокса. Если коэффициент D в интерфейсе отличается от нуля, уравнение (2) описывает движение жидкости или газа в изотропной пористой среде. Реализованный численный алгоритм не зависит от локального числа Маха. Он позволяет рассчитывать до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения.

Геометрия и начальные условия

Рабочие колеса бироторной гидротурбины были спроектированы в программе автоматизированного проектирования КОМПАС 3D, вне программного комплекса FlowVision. Диаметр 1-го рабочего колеса 0,2 м, диаметр втулки 0,07 м, количество лопастей 3. Диаметр 2-го рабочего колеса 0,2 м, диаметр втулки 0,07 м, количество лопастей 3. Межтурбинное расстояние 0,01 м. 3D-модель бироторной турбины представлена на рисунке 1.

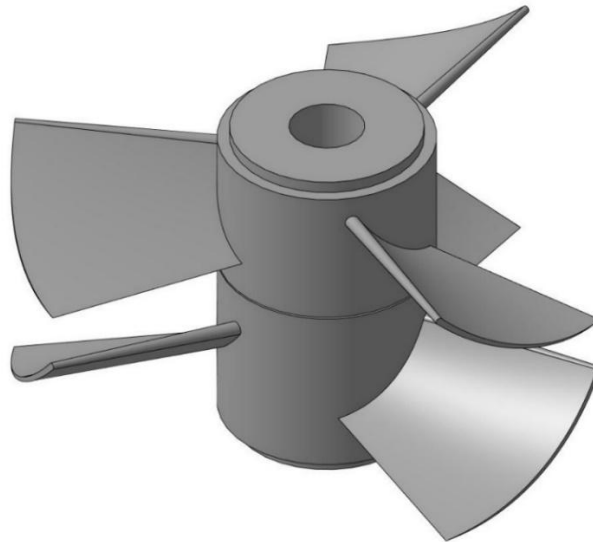


Рисунок 1 – 3D-модель бироторной гидротурбины

На следующем этапе методом вычитания 3D-модели бироторной гидротурбины из замкнутого объема была создана геометрия расчетной области, т.е. модель жидкости, заполнившей бироторную турбину, которая представлена на рисунке 2. Данная геометрия импортирована во FlowVision, и в ней создается проект.

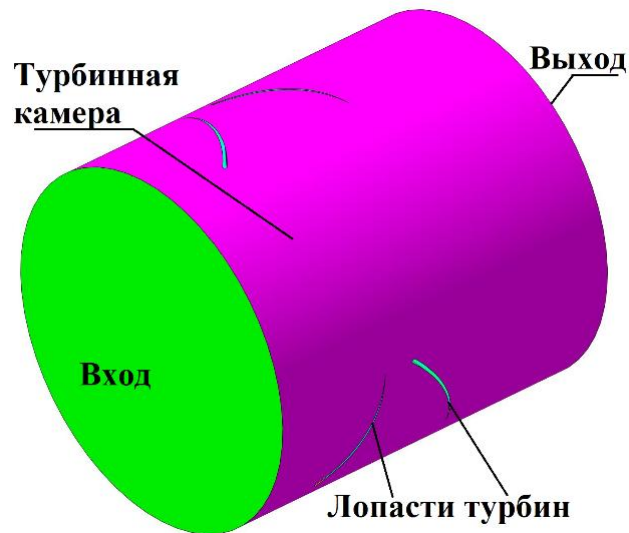


Рисунок 2 – Геометрия расчетной области бироторной гидротурбины

Далее в древе проекта создается физическая модель, где устанавливаются вещество, опорные величины и решаемые уравнения. Затем расставляются граничные условия, создается расчетная сетка, слои и результаты.

На рисунке 3 представлены все результаты визуализационных слоев моделирования бироторной гидротурбины. Как видно из рисунка, были получены данные о распределении скорости в бироторной гидротурбине, направления векторов и линий тока, а также распределения давлений на лопастях гидротурбин. Эти результаты получены в режиме стационарной гидродинамики, что означает, система рассматривается как статическая или неподвижная в течение всего расчетного периода, изменения параметров жидкости, такие как скорость и давление, могут быть учтены только как результаты стационарного расчета. В дальнейшем наши исследования будут направлены на решения поставленных выше задач в переходных режимах.

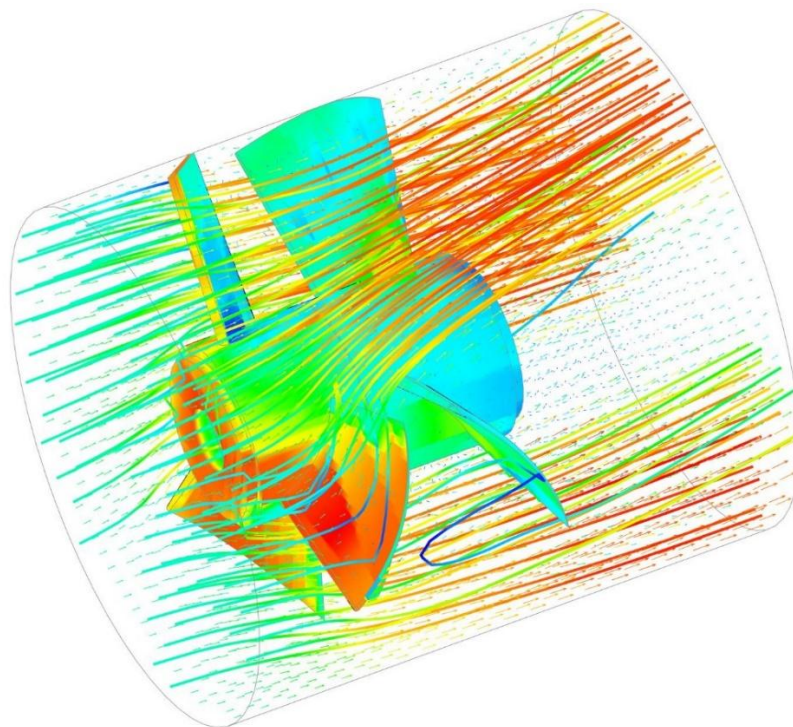


Рисунок 3– Результаты моделирования

Заключение

В заключение можно сделать следующие выводы: в контексте мировой тенденции к развитию ВИЭ использование гидроэнергии малых рек, особенно в странах с гористым рельефом, становится важным и перспективным источником электроэнергии. Малые и микро-ГЭС обладают рядом преимуществ, включая высокую эффективность, способность к снижению выбросов углерода и возможность решения проблем электроснабжения. Для эффективного использования потенциала малых гидроресурсов необходимо проводить исследования в данной области с целью улучшения и оптимизации параметров. Для эффективного использования потенциала малых ГЭС необходимо проводить исследования, такие как гидродинамический анализ бироторных микро-ГЭС с использованием современных методов, включая вычислительную гидродинамику. Эти исследования помогут оптимизировать производительность гидротурбин и улучшить их параметры. Эти данные представляют собой важный базис для дальнейших исследований и оптимизации. Дальнейшие научные исследования и оптимизация технологии позволят улучшить производительность и надежность бироторных микро-ГЭС и внедрить их в практику для обеспечения устойчивого энергоснабжения.

Литература:

1. IRENA (2022), Прогноз преобразования мировой энергетической системы 2022 года: стратегия по ограничению глобального потепления 1,5°C, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Абу-Даби.
2. LIU, D., LIU, H., WANG, X., and Kremere, E., eds. (2019). World Small Hydropower Development Report 2019. United Nations Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power. Available from www.smallhydropower.org.
3. Малые ГЭС в Кыргызской Республике: Оценка потенциала и сложностей развития/ Всемирный банк, Глобальная практика в области энергетики и добывающих отраслей/ Итоговый отчет/ Июнь 2017 г.
4. 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.
5. <http://www.nesk.kg/ru/9-o-kompanii/> (Дата обращения: 24.08.23)
6. <https://nehk.energo.kg/> (Дата обращения: 24.08.23)
7. Медеров Т.Т. Бироторная микрогидроэлектростанция / Т.Т. Медеров, Р.У. Ураимов // Материалы международной научно-практической конференции на тему «Качественное образование, передовая наука, зеленая экономика – будущее планеты». – Алматы, 2014. – С. 279 – 282.
8. Медеров Т.Т. Особенности работы бироторных микрогидроэлектростанций / Т.Т. Медеров, А. Дж. Обозов // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, №31. – Бишкек, 2014. – С. 205–208.
9. Викторов, Г.В. Гидродинамическая теория решеток. – М.: «Высшая школа», 1969. – 368 с.
10. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа/Учеб. для вузов. – Изд. 7-е / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.