

ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

e-mail:

urj@inbox.ru,

urj@oshsu.kg

тел.моб.: 0555-08-13-72



Ураимов Рабшанбек Жусупович

УРАИМОВ РАБШАНБЕК ЖУСУПОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НАПЛАВНОЙ МИКРОГЭС

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор, член-корр. НАН КР

Обозов А.Дж.

Ош 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА СОЗДАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ МИКРОГЭС	8
1.1 Анализ развития гидроэнергетики на современном этапе	8
1.2 Оценки и пути развития малой гидроэнергетики в КР	17
1.3 Обобщение опыта использования микроГЭС	25
1.4 Синтез и описание принципиальной схемы наплавной микроГЭС	38
Выводы по Главе I	42
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ И МАТЕМАТИЧКОЙ МОДЕЛИ НАПЛАВНОЙ МИКРОГЭС	44
2.1 Расчетная схема и методика выбора основных параметров гидротурбины.	44
2.2 Методология решения задачи матричным способом.	51
2.3 Решение связанных задач Навье – Стокса.	58
2.4 Реализация алгоритма	58
2.5 Обобщенная математическая модель наплавной микроГЭС.	71
2.6 Особенности изменения кинематических и динамических параметров	72
Выводы по Главе II	76
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКИ	78
3.1 Конструктивная схема и компоновка наплавной микроГЭС.	78
3.2 Методология выбора и расчета основных параметров микроГЭС	82
3.3 Разработка цифрового устройства для балластной нагрузки автономной микроГЭС	87
Выводы по главе III	94
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЭС	96
4.1 Цель и задачи экспериментальных исследований	96
4.2 Конструкция опытного образца микроГЭС.....	98
4.3 Результаты экспериментов и их обработка.	105
Выводы по главе IV	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	128

ВВЕДЕНИЕ

В связи с уменьшением запасов углеводородных видов топлив (нефть, газ, и т.д.) перед человечеством всего мира возникла задача по освоению возобновляемых источников энергии. В настоящее время в США, Китае, ЮАР, Италии и Индии успешно внедряются энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии для удовлетворения потребностей в энергетике.

В ведущих странах Евросоюза (ЕС) по оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) производство энергии из ВИЭ ежегодно растет на 10-20%. По прогнозам Европейского совета по возобновляемой энергетике к 2040 году возобновляемые источники смогут обеспечить 50 % производства энергии в мире. В соответствии с решением Европарламента доля ВИЭ в энергобалансе ЕС в 2020 году должна составить 20 %, в 2040 году - 40 %. Лидерами в использовании ВИЭ в ЕС являются Норвегия (64,7 %), Швеция (46,8 %), Латвия (33,1 %) и Финляндия (31,8 %). Одну из ведущих позиций по уровню развития практически всех видов ВИЭ занимает Германия. В 2004 году в Германии был принят специальный закон («EGG») который предусматривает расширение доли ВИЭ в электроэнергетике к 2020 году до 35%, 2030 году - до 50 %. В 2011 году этот показатель составил 20%.

В всем мире проводятся целенаправленные работы по развитию всех разновидностей ВИЭ. Однако, наибольшее предпочтение отдается использованию энергии малых водотоков.

Большинство стран мира имеют программы развития малой гидроэнергетики как одного из видов возобновляемых источников. В результате дальнейшего совершенствования технологий использования гидроэнергетического потенциала малых рек и соответствующего снижения стоимости производимой ими электроэнергии, а также государственной поддержки этого сектора энергетики, в большинстве развитых и во многих развивающихся странах мира ее доля неуклонно возрастает. Этому в немалой степени способствует рост использования возобновляемых источников

энергии, вызванный необходимостью адаптации к глобальному изменению климата, снижения расходования и экономии органических ресурсов

Таким образом, можно сказать, что малая гидроэнергетика в обозримой перспективе останется одним из самых важных и конкурентоспособных возобновляемых источников энергии.

В государствах – участниках Содружества Независимых Государств (СНГ) также разрабатываются программы развития малой гидроэнергетики, разрабатываются новые технологии использования энергии малых водотоков, разрабатываются новые конструкции микроГЭС. Необходимо отметить заслуги таких ученых как Головин М.П., Иванов В.М., Блинов Б.С., Ленев В.И., Ф. Цотлётерер, С. Девис, Харрис, Токомбаев К.А., Кадыркулов С.С., и др. внесших огромный вклад в развитии малой энергетики.

Кыргызская Республика обладает большим потенциалом для развития гидроэнергетики. По объему формируемых на ее территории водных ресурсов республика занимает третье место среди государств СНГ. В стране насчитывается 252 крупные и средние реки, потенциал которых оценивается в 18.5 млн кВт мощности и более 140–160 млрд кВт.ч электроэнергии, из которых используется менее 10%. Экономический потенциал гидроэнергетики Кыргызстана заметно превышает потенциал других, вместе взятых возобновляемых источников энергии. Потенциал малых рек и водотоков оценивается в 1.6 млн кВт мощности, а выработка может составить порядка 5–8 млрд кВт.ч в год.

И поэтому одним из важных и актуальных научных задач является поиск, разработка, создание и внедрения оригинальных, высокоэффективных, надежных и недорогих конструкций микроГЭС для удовлетворения потребностей в электроэнергии рассредоточенных потребителей. Настоящая диссертационная работа направлена на разработку и создание бироторного микроГЭС наплавного типа, отличающегося от известных надежностью, высокой эффективностью и простотой эксплуатации.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование

автономной бироторной микрогидроэлектростанции мощностью 0,5-1 кВт наплавного типа для энергоснабжения маломощных приборов рассредоточенных потребителей.

Достижения поставленной цели предполагает решения ряда научных и практических задач:

1. Анализ современного состояния исследований по разработке и созданию микроГЭС для автономного энергообеспечение рассредоточенных потребителей;
2. Разработка математической модели основных параметров наплавной бироторной микроГЭС
3. Разработка методики расчета и выбор параметров бироторной микроГЭС наплавного типа и её численной реализация.
4. Разработка конструкции наплавного бироторного микроГЭСа.
5. Исследования и моделирования динамики взаимодействия рабочего колеса с водным потоком.
6. Разработка цифрового устройства для исследования балластной нагрузки в автономных микроГЭС.
7. Создания опытного образца бироторного микроГЭС наплавного типа и экспериментального исследование полевых условиях.

Методы исследований. В работе использованы современные методы математического моделирования, компьютерного моделирования, методы гидродинамического анализа. Исследования проводились с применением систем программирования Flowvision, Solidworks и Ansys.

Научная новизна полученных результатов:

- Впервые разработана и предложена оригинальная конструкции бироторной микроГЭС наплавного типа.
- Разработан новый метод расчета и выбора геометрических и гидравлических параметров рабочего колеса бироторной микроГЭС наплавного типа.

- Построена обобщенная математическая модель взаимодействия лопастей рабочего колеса с водным потоком с использованием программ MatLAB.

- Впервые предложено и защищено патентом КР (Патент №1808) принципиально новое техническое решение конструкции бироторной микроГЭС наплавного типа.

- Впервые разработана цифровое устройство балластной нагрузки автономной микроГЭС наплавного типа.

- Разработан алгоритм для исследования взаимодействия гидравлического потока с рабочими колесами.

- Создан действующий образец бироторной микроГЭС наплавного типа.

Практическая значимость полученных результатов:

- Предложенные принципиально новые технические решения бироторной микроГЭС наплавного типа позволяют повысить её эффективность.

- Предложенная методика расчета гидродинамических параметров рабочих колес позволила осуществить разработку нового класса бироторных микроГЭС наплавного типа.

- Результаты исследований были использованы в учебном процессе при подготовке студентов соответствующих энергетических специальностей.

- Разработана и создана действующий образец оригинальная конструкция бироторной микроГЭС наплавного типа.

- Созданный образец бироторной микроГЭС наплавного типа используется в учебно-лабораторных целях.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Технические решения, защищенный патентом на изобретения КР, конструкция бироторной микроГЭС наплавного типа.

- Разработанные методы расчета и выбора геометрических и гидравлических параметров рабочих колес бироторной микроГЭС наплавного

типа.

- Расчетная модель рабочих колес бироторной микроГЭС.
- Разработанное цифровое устройство для балластной нагрузки автономной микроГЭС.
- Разработанный алгоритм расчета цифровой модели автономной микроГЭС.

Реализация результатов:

- Результаты исследований взаимодействия потока и рабочих колес реализованы в разработанных методах расчета и проектировании микроГЭС наплавного типа.
- Разработанные новые методы расчета и выбора геометрических и гидравлических параметров рабочих колес реализованы при проектировании и изготовлении действующего опытного образца бироторной микроГЭС наплавного типа.
- Разработанный и изготовленный бироторной микроГЭС наплавного типа используется в учебном процессе кафедры «Электроэнергетики» ОшГУ.
- Методы расчета, проектирования и эксплуатации бироторной микроГЭС наплавного типа переданы в сельское управа им. Н.Исанова Ноокатского района Ошской области.

Личный вклад соискателя.

Все научно-технические результаты диссертационной работы, в основном, получены лично автором под руководством научного руководителя.

Апробации результатов диссертации

Основные результаты диссертации автором опубликованы в специализированных журналах. Докладывались и обсуждались на международных и республиканских научно-технических конференциях, а также результаты работы докладывались на расширенном заседании кафедры «Энергетика» ОшГУ.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе 9 статей все в периодических изданиях 8 рекомендованных ВАК КР 1 статья опубликована в журнале индексируемой системой SCOPUS 1 патент на изобретения в Государственной патентной службе Кыргызской республик

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 132 наименований и 1 приложений. Содержательная часть изложена на 119 страницах компьютерного текста, содержит 4 таблиц, 55 рисунка.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА СОЗДАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ МИКРОГЭС

1.1 Анализ развития гидроэнергетики на современном этапе

Согласно базовым прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), среднегодовые темпы роста производства электроэнергии на крупных ГЭС в 2007-2030 годах составят 2%, к 2030-му производство энергии на них превысит 4380 Тераватт-час (ТВтч). Доля крупных гидроэлектростанций в общем мировом производстве электроэнергии снизится до 12.4% (WEO, 2008) [107].

В то же время, прогнозные сценарии развития мировой гидроэнергетики показывают возможность увеличения установленной мощности ГЭС до 1700 ГВт к 2050-му. На перспективу дальнейшего развития гидроэнергетики могут оказать влияние и последствия глобального изменения климата, что требует проведения соответствующих исследований и принятия соответствующих мер. Серьезное препятствие для развития гидроэнергетики развивающихся стран, расположенных в бассейнах трансграничных рек может оказать и недостаточная урегулированность вопросов совместного водопользования, особенно при строительстве крупных гидрообъектов.

Гидроэлектрические станции – один из источников энергии, претендующих на экологическую чистоту. В начале XX века крупные равнинные и горные реки мира привлекли к себе внимание энергетиков, а к концу столетия большинство из них было перегорожено каскадами плотин ГЭС, дающих дешевую электроэнергию.

Однако это привело к значительному ущербу для сельского хозяйства и природы: земли выше плотин подтоплялись; на территориях, расположенных ниже, наблюдалось падение уровня грунтовых вод; терялись большие территории земли, находившейся в сельскохозяйственном обороте прерывалось естественное течение рек, что в ряде случаев приводило к загниванию воды в водохранилищах, к уменьшению рыбных запасов.

При строительстве ГЭС на горных реках все перечисленные выше их отрицательные стороны развития сводились к минимуму. Но при этом в случае сильных землетрясений, возникает вероятность разрушения плотины, что может привести к многочисленным человеческим жертвам.

В связи с этим, поиск других путей развития источников энергии на основе использования потенциала водных ресурсов остается актуальной задачей.

В качестве одного из возможных вариантов исключения выше перечисленных недостатков крупных ГЭС при одновременном использовании их преимуществ, в настоящее время рассматривается разработка мини- и микроГЭС.

Основными преимуществами этих ГЭС является то, что могут располагаться на небольших реках или даже ручьях, а их гидроагрегаты способны работать при небольших перепадах уровней воды или будучи движимыми лишь силой течения. Подобные мини-ГЭС могут быть установлены и на крупных реках с относительно быстрым течением без сооружения плотин.

В настоящее время нет общепринятого для всех стран понятия малой гидроэлектростанции, однако во многих странах в качестве основной характеристики такой ГЭС принята ее установленная мощность. К малым, как правило, относятся ГЭС мощностью до 10 МВт (в некоторых странах до 50 МВт) [110].

В настоящее время, суммарный потенциал гидроэнергетики в мире оценивается в 8100 млрд кВт·ч. При этом, примерно 10 %. Электроэнергии, было выработано малыми и микроГЭС [111].

По информации Министерства водного хозяйства КНР, объем запасов гидроэнергетических ресурсов в сельских районах страны составляет 128 млн кВт. Согласно имеющимся данным [112], в настоящее время в этой стране насчитывается примерно 50 тыс. малых ГЭС. Благодаря этому почти половина

территории Китая, третья часть уездов и четвертая часть населения страны обеспечены электроэнергией за счет малых ГЭС.

В больших масштабах ведется строительство малых ГЭС в Индии. К настоящему времени установленная мощность введенных в эксплуатацию малых ГЭС в этой стране превышает 200 МВт, намечено строительство еще 4 тыс. мини-ГЭС [112]. Традиции в использовании энергии малых рек существуют в Польше, где еще до начала Второй мировой войны работало 6800 малых ГЭС. Широкое распространение малые ГЭС получили в Австрии, Финляндии, Норвегии, Швейцарии [112, стр.98]

В Швейцарии доля производства электроэнергии на МГЭС достигла 8.3%, в Испании - 2.8%, в Швеции - почти 3%, а в Австрии - 10%. Лидирующее положение по совокупным генерирующим мощностям *МГЭС* занимает Китай (47 ГВт), на втором месте - Япония (4 ГВт), на третьем - США (3.4 ГВт), затем Италия и Бразилия [100, 108].

Суммарные мировые инвестиции в малую гидроэнергетику в 2006 году составили около \$6 млрд. Средняя стоимость строительства малых гидроэлектростанций составила от \$1.5 до \$2.5 тыс. за 1 кВт установленной мощности [100, 108].

Развитие гидроэнергетики имеет долгосрочные экономические преимущества, прежде всего с позиции возможности ее диверсификации, более эффективного и многоцелевого использования гидроэнергетического потенциала не только крупных рек, но и малых. Это направление ускоренно формируется в развитых и развивающихся странах, особенно в сельской местности, в районах, удаленных от энергосистем. Строительство МГЭС имеет также широкие перспективы развития в различных регионах мира с трансграничными речными бассейнами.

Преимущества МГЭС: смягчение влияния глобального изменения климата на окружающую среду за счет снижения выбросов CO₂; эффективные технологии; минимальные площади затопления и застройки; местное и региональное развитие; помощь в обслуживании речного бассейна;

электрификация сельских территорий; небольшой срок окупаемости. При строительстве и эксплуатации МГЭС сохраняется природный ландшафт, практически отсутствует нагрузка на экосистему. К преимуществам малой гидроэнергетики, по сравнению с электростанциями на органическом топливе, можно также отнести низкую себестоимость электроэнергии и эксплуатационные затраты, относительно недорогую замену оборудования, более длительный срок службы ГЭС (40-50 лет), комплексное использование водных ресурсов (электроэнергетика, водоснабжение, мелиорация, охрана вод, рыбное хозяйство).

В 2008 году инвестиционные затраты ГЭС (>10 МВт) оценивались в диапазоне от \$1750 до \$6250 за 1 кВт установленной мощности и в среднем составляли около \$4 тыс. за 1 кВт [107].

Инвестиционные затраты МГЭС (1-10 МВт) и очень малых ГЭС (<1 МВт) могут варьироваться от \$2000 до \$7500 за 1 кВт и от \$2500 до \$10000 за 1 кВт, соответственно, и составлять для указанных видов ГЭС в среднем \$4500-5000 за 1 кВт. [107, 108]

Эксплуатационные расходы и техническое обслуживание гидроэнергетики составляют от 1.5 до 2.5% инвестиционной стоимости в год. В результате общая стоимость генерации для крупных ГЭС может составлять \$40-110 за 1 МВт (в среднем \$75 за 1 МВт); для МГЭС - \$45 и \$120 за 1 МВт (в среднем \$83) и для микроГЭС - от \$55 до \$185 за 1 МВт (в среднем \$90) [116].

В Китае к малым относятся ГЭС мощностью от 1 до 50 МВт, они играют важную роль в обеспечении электроэнергией сельских районов: 45 тыс. малых гидросооружений вырабатывают 70 млрд кВт.ч для 300 млн сельских жителей. Китай планирует расширить использование малой гидроэнергетики: в ближайшие годы в ее развитие будет инвестировано \$16.5 млрд. С 300 до 782 возрастет количество уездов, в которых будут построены такие объекты. Значительная их часть работает в комплексе с ирригационными сооружениями. Развитию малой гидроэнергетики в стране и распространению опыта

Китая в этой области способствует международный центр МГЭС, созданный правительством страны, ЮНИДО и ПРООН в Ханчжоу (провинция Чжэцзян, Восточный Китай). В рамках программы электрификации (The China Township Electrification Program) до 2005 года в Китае была проведена электрификация 1000 поселков, в том числе с помощью малых гидроэлектростанций. В 2006-м была запланирована следующая программа электрификации деревень (China Village Electrification Program), цель которой - обеспечить электрической энергией к 2010 году 10 тыс. деревень, включая инвестиции в строительство малых гидроузлов [113].

В сфере использования возобновляемых источников энергии Китай, постепенно завоевывает лидирующие позиции в мире. Для сравнения, это в три раза больше, чем выработка электроэнергии всей энергосистемой России. В 2020 году на основе ВИЭ в Китае было произведено 2210 ТВт.ч. [114].

Центр производства оборудования для малых гидроэлектростанций постепенно смещается в Китай, который обеспечивает значительную долю его мирового выпуска.

Развитию малой гидроэнергетики уделяется значительное внимание и в других странах. Европейский союз планировал к 2010 году довести установленные мощности МГЭС до 14 ГВт. Средняя стоимость 1 кВт.ч электроэнергии, выработанного на такой станции, в Европе в 2005 году составляла около \$0.03 [114].

Удельные затраты на строительство малых гидроэлектростанций при их индивидуальном проектировании и возведении нередко могут превышать удельные затраты на строительство крупных ГЭС. Вместе с тем опыт проектирования и строительства различных малых гидроузлов все же позволяет говорить о возможности значительного снижения удельной стоимости вводимых мощностей при условии типового проектирования, унификации оборудования, применения местных материалов. В странах Евросоюза, принимая во внимание эти факторы, расширяют использование гидроэнергетических ресурсов малых рек.

Масштабы и темпы развития малой гидроэнергетики зависят от наличия и степени разработанности соответствующих технологий и в конечном итоге - от себестоимости получаемой энергии. Несмотря на то, что электроэнергия, вырабатываемая на крупных ГЭС, одна из самых дешевых, во многих странах, особенно развитых, рост мощностей крупной гидроэнергетики в последние годы сдерживается по ряду объективных причин. К ним можно отнести, в первую очередь, необходимость привлечения значительных и долгосрочных инвестиций, высокие затраты на компенсационные природоохранные и социальные мероприятия, длительный срок строительства, полное исчерпание технически доступного и экономически обоснованного гидроэнергетического потенциала [117].

Рынок крупных ГЭС определяют несколько производителей основного оборудования и большое число поставщиков вспомогательных компонентов и систем. В отличие от этого рынок малых гидросооружений представлен значительным количеством производителей оборудования, которое более технологично для применения огромного разнообразия конструкций и новых материалов. Экспертные оценки определяют значительный рост потребности в МГЭС. В настоящее время существует огромное количество производителей современного унифицированного оборудования для малых гидрообъектов. Конструкции, применяемые при создании таких агрегатов, весьма разнообразны: радиально-осевые, пропеллерные, ковшовые. Выбор типоразмера агрегата зависит от величин напора и расхода воды и в ряде случаев требует индивидуального проектирования МГЭС.

С учетом ограниченности гидроресурсов в мире можно предположить, что в период до 2030 года темпы развития гидроэнергетики заметно снизятся, но при этом будет поддерживаться диверсификация малой гидроэнергетики. При темпе роста в 4.5-4.7% производство электроэнергии на малых ГЭС достигнет к 2030 году 770-780 ТВт.ч, что будет составлять более 2% всего производства электроэнергии в мире. Таким образом, можно сказать, что

малая гидроэнергетика в обозримой перспективе останется одним из самых важных и конкурентоспособных возобновляемых источников энергии.

Большинство стран мира имеют программы развития малой гидроэнергетики как одного из видов возобновляемых источников. В результате дальнейшего совершенствования технологий использования гидроэнергетического потенциала малых рек и соответствующего снижения стоимости производимой ими электроэнергии, а также государственной поддержки этого сектора энергетики, в большинстве развитых и во многих развивающихся странах мира ее доля неуклонно возрастает. Этому в немалой степени способствует рост использования возобновляемых источников энергии, вызванный необходимостью адаптации к глобальному изменению климата, снижения расходов и экономии органических ресурсов.

В государствах - участниках Содружества Независимых Государств (СНГ) также разрабатываются программы развития малой гидроэнергетики, в целом оказывается поддержка этой отрасли энергетики. Можно отметить рост числа восстановленных ранее выведенных из эксплуатации МГЭС, использование действующих ирригационных гидросооружений для строительства в их составе МГЭС. Необходимо подчеркнуть, что объекты МГЭС - сфера, привлекающая интерес частного капитала. Сроки окупаемости строительства малых гидросооружений - 4-5 лет, а с ростом стоимости электроэнергии, приобретаемой на оптовом и розничных рынках, эти сроки уменьшатся через относительно короткий период года в полтора раза, что привлекательно для малого и среднего бизнеса.

Однако необходимо отметить общие и специфические проблемы стран СНГ, препятствующие дальнейшему развитию этой отрасли. В первую очередь, это отсутствие долгосрочных финансовых ресурсов для возведения малых ГЭС. Заказчиками строительства в основном являются региональные и муниципальные органы исполнительной власти, средний бизнес. Финансирование такого строительства из государственного бюджета, как правило, не предусматривается. Банки и лизинговые компании не принимают

должного участия в строительстве МГЭС из-за длительного (по условиям финансирования банками) срока окупаемости, незначительных объемов капитальных вложений. Сложной и длительной остается процедура отвода земель под строительство малых гидроэлектростанций, согласования проектов станций. В некоторых странах СНГ сетевые компании завышают требования по технологическому присоединению к сетям МГЭС.

В других странах СНГ также ожидается незначительный рост использования возобновляемой энергетики, в том числе малой. В этой связи целесообразно создание межгосударственного органа в рамках существующих интеграционных структур СНГ по развитию возобновляемой энергетики, который оказывал бы научно-техническое содействие разработкам в этой области.

Кыргызская Республика обладает большим потенциалом для развития гидроэнергетики. По объему формируемых на ее территории водных ресурсов республика занимает третье место среди государств СНГ [118] стране насчитывается 252 крупных и средних реки, потенциал которых оценивается в 18.5 млн кВт мощности и более 140-160 млрд кВт.ч электроэнергии, из которых используется менее 10% [119, стр.11]. Исследован гидроэнергетический потенциал практически всех рек. Большим и запасами гидроэнергоресурсов обладают реки Нарын, Сары-Джаз, Кекемерен, Чаткал, Тар, Чу, Кара-Дарья и Чон-Нарын, у которых средние уклоны изменяются от 5 до 20 м на 1 км длины, а средняя удельная мощность составляет от 2227 до 5322 кВт/км. В электроэнергетической отрасли эксплуатируются 17 электрических станций с суммарной установленной мощностью 3.68 млн кВт, в том числе две тепловые электростанции с установленной мощностью 0.73 млн кВт, 15 ГЭС с установленной мощностью 2.95 млн кВт. Более 80% электроэнергии вырабатывается ГЭС Нарынского каскада.

Экономический потенциал гидроэнергетики Кыргызстана заметно превышает потенциал других, вместе взятых возобновляемых источников

энергии. Потенциал малых рек и водотоков оценивается в 1.6 млн кВт мощности, а выработка может составить порядка 5-8 млрд кВт.ч в год [119].

Необходимо отметить, что около 90% малых водотоков сосредоточено в верхних и средних русловых участках, где в сельской и горной местности расположены рассредоточенные потребители, испытывающие наибольший дефицит электроэнергии. Один из наиболее эффективных способов развития электроэнергетики - использование потенциала малой и средней энергетики. Сооружение малых гидроэлектростанций, особенно в горных районах позволит обеспечить развитие малого и среднего предпринимательства в сфере сельского хозяйства, промышленности, туризма, улучшить социально-бытовые условия населения, занимающегося отгонным животноводством, организацию сезонной переработки сельхоз сырья, производство строительных материалов. Малая и средняя энергетика позволит повысить энергетическую безопасность страны, обеспечить электричеством население удаленных и труднодоступных районов.

До строительства крупных ГЭС и создания энергосистем в республике насчитывалось около 200 малых станций. Практически все они были выведены из эксплуатации, в настоящее время имеется всего 10 действующих МГЭС [121, стр.20].

Большая помощь оказывается Кыргызстану со стороны Программы развития Организации Объединенных Наций (ПРООН). В 2005-2008 годах проведена оценка потенциала развития микроГЭС, выявлены существующие барьеры, определены институциональные и регулятивные рамки для использования таких гидроузлов и их серийного производства на территории страны. В Иссык-Кульской области установлено 13 микростанций местного и зарубежного производства для тестирования технологий и последующего применения в сельских условиях горных территорий страны. Оказана техническая и консультативная помощь местной компании в подготовке производства к серийному выпуску микроГЭС мощностью 1.5 кВт

(однофазная) и 5 кВт (трехфазная), разработан проект правил подключения МГЭС к сетям распределительных компаний.

В рамках государственной политики в области малой гидроэнергетики принята программа развития малой и средней энергетики республики до 2012 года. Ее основные задачи: реализация государственной политики в сфере малой и средней энергетики.

В целях привлечения инвестиций предусмотрена государственная поддержка в решении вопросов отвода земельных участков под строительство объектов энергетики, их проектирования, строительства, эксплуатации и реализации электроэнергии, в создании условий для транзита произведенной электроэнергии, в том числе на экспорт, защите инвестиций.

Таким образом, на основе анализа развития гидроэнергетики в мировой практике можно отметить, что развитие направления по разработке и строительстве малых и микроГЭС в настоящее время рассматривается как одно из перспективных направления развития энергетики. Для Кыргызстана это направление особенно важно если учесть особенности рельефа (более 90% гор) и наличие многочисленных горных рек, на которых можно строить малые и микроГЭС.

1.2 Оценки и пути развития малой гидроэнергетики в КР

На территории Кыргызстана предусматривается широкое использование экологически чистых источников электроэнергии, так как строительство крупных гидроэлектростанций приводит к деградации сельскохозяйственных земель, пастбищ и лесов, приводит к нарушению экологического равновесия, что особенно важно, в курортных зонах и заповедниках.

По результатам исследований [122], в настоящее время в республике существуют 453 потенциальных створа малых рек, на которых можно построить малый ГЭС с суммарной мощностью 1380 МВт.

Для условий Кыргызстана наиболее перспективными областями применения, использующих энергию солнца, малых водотоков, являются

объекты, расположенные в отдаленных горных и сельских районах не имеющих централизованного энергоснабжения. К их числу можно отнести фермерские, животноводческие комплексы, горнорудные предприятия, дорожно-эксплуатационные службы, туристическо-оздоровительные объекты, насосные станции, объекты лесного и охотничьего хозяйств, а также жилые дома, объекты социально-бытового назначения и торговли, лечебно-оздоровительные учреждения.

Одним из факторов развития гидроэнергетики может стать также восстановление существующих и строительство новых малых ГЭС. Суммарный гидроэнергетический потенциал обследованных на территории республики 172 рек и водотоков с расходом воды от 1,5 до 5 м³/сек превышает 80 млрд. кВт*ч в год, из них технически приемлемый к освоению гидроэнергетический потенциал составляет 5-8 млрд. кВт*ч в год [123, стр.12].

По предложениям специалистов уже сейчас есть возможность соорудить 92 новых малых ГЭС с суммарной мощностью 178 МВт и среднегодовой выработкой до 1,0 млрд. кВт*ч электроэнергии. Кроме того, разработаны предложения по строительству 7 ГЭС на ирригационных водохранилищах, с установленной мощностью 75 МВт и среднегодовой выработкой электроэнергии около 220 млн. кВтч [124].

Особо важное место все эти станции могут иметь для электроснабжения рассредоточенных объектов в горной и сельской местности с развитой гидрографической сетью, где строительство крупных линий электропередачи экономически не выгодно.

Удельные затраты на строительство новых малых ГЭС зависят в значительной мере от месторасположения станции и производителей оборудования и составляют 800-1500 долл. США.

Себестоимость выработки электроэнергии на восстанавливаемых малых ГЭС может составить 2-8,0 центов/кВтч, на вновь строящихся малых ГЭС - 3,5-3,6 центов/кВтч, на малых ГЭС при ирригационных водохранилищах - 0,6-

1.1 центов/кВт-ч.

По предварительным расчетам, расчетам, срок окупаемости малой ГЭС, при существующих тарифах 0,01-0,015 \$ США/кВтч составляет 7-10 лет.

Потенциальные ресурсы возобновляемых источников энергии определяются климатическими характеристиками, условиями подстилающей поверхности и объемом отходов сельскохозяйственного производства и промышленной переработки его продукции.

Вычисление потенциальных ресурсов крупных и средних водотоков проводится методом «линейного учета», путем деления каждой реки на участки в точках перелома профиля реки и определения энергии этих участков в кВт [49].

Величина технического потенциала определяется в результате непосредственного составления схем и проектов использования водотоков с определением возможной выработки всех каскадов ГЭС. Так же технический потенциал может быть определен косвенным методом на основе анализа имеющихся данных по хорошо изученным рекам и определения коэффициента использования валового потенциала, который в среднем по Кыргызстану может быть принят равным 0,54. Экономический потенциал определяется путем сопоставления экономически оправданных удельных капиталовложений отдельных ГЭС со сроком окупаемости до 8 лет по ценам на используемое топливо для производства электроэнергии [125].

Определяющим показателем для малой гидроэнергетики должна быть степень удельной мощности перспективных малых ГЭС на количество жителей на данной местности.

Технический и экономический потенциал речного стока зависит главным образом от, комплексной изученности рек. В связи с чем, можно отметить, что на данный момент экономический потенциал освоения как крупной и средней, так и малой и микро-гидроэнергетики обоснован лишь на уровне 50-60% [126].

При выборе местоположения микроГЭС необходимо предварительно

оценить объем потенциальных и утилизируемых энергоресурсов, на основании которых определяется экономическая эффективность их использования.

Технический гидроэнергетический потенциал 252 крупных и средних рек республики, подвергнутых изучению, составляет 73 млрд. кВтч. Экономически оправданными для освоения считаются 55 млрд. кВтч в год [49].

Использование гидроэнергетического потенциала малых рек позволит получить около 350 млн. кВтч ежегодно, что эквивалентно замещению 45[^]50 тыс. т.у.т.(тонна условного топлива). Однако использование энергии малых рек сдерживается рядом технических, экономических и институциональных факторов. Значительным является и экономический потенциал использования микроГЭС, который оценивается в 1,6 млн. кВт по мощности.

Высокими концентрированными потенциальными запасами гидроэнергоресурсов обладают 9 рек Кыргызстана. Нарын, Сары-Джаз, Кекемерен, Чаткал, Тар, Чу, Кара- Дарья и Чон-Нарын, у которых средние уклоны лежат в пределах от 5 до 20 м на 1 км длины, а средняя удельная мощность составляет от 2227 до 5322 кВт/км. [42]. В настоящее время освоение гидроресурсов малых рек в Республике составляет всего 3%. В то же время для производства не используются электроэнергии ресурсы ирригационных водохранилищ, многих каналов и рек [127].

По предварительной оценке, представляется возможным в сжатые сроки построить 41 малую ГЭС, суммарной мощностью 178 МВт и среднегодовой выработкой 1,1 млрд. кВтч электроэнергии. Кроме того, экономически обоснована целесообразность модернизации и восстановления 46 действующих и ранее работавших малых ГЭС, мощностью 58,8 МВт со среднегодовой выработкой 210 млн. кВтч электроэнергии. Окупаемость капиталовложений в строительство и модернизацию этих ГЭС составит примерно от 3 до 5 лет [126].

Сооружение малых ГЭС, особенно в горных районах, позволит надежно

обеспечить развитие малого и среднего предпринимательства в сфере сельского хозяйства, промышленности, туризма, улучшить социально-бытовые условия населения, работающего в сфере отгонного животноводства, организацию сезонной переработки сельхоз сырья, производство строительных материалов.

Необходимо отметить, что около 90% потенциальной энергии малых водотоков сосредоточено в верхних и средних русловых участках рек. На этих местах расположены также большинство рассредоточенных энергопотребителей.

Таким образом, на основе имеющихся данных можно заключить, что в КР имеется достаточно большое количество горных рек, на которых можно строить малые ГЭС, с суммарной выработкой энергии, достаточной для удовлетворения значительной части энергопотребления.

Выявление гидроэнергетического потенциала, как крупных и средних, так и малых водотоков является актуальной по значимости задачей для развития гидроэнергетики. Значительные запасы экономически оправданных к освоению гидроресурсов, их высокая концентрация и относительно равномерное распределение по территории республики, определяет долгосрочную перспективу строительства большого количества мощных и маломощных ГЭС.

Одновременно с этим, строительство и эксплуатация малых ГЭС может оказать также существенное влияние на энергетическую ситуацию в Республике, так как позволит несколько увеличить выработку электроэнергии и разгрузки энергосистемы по мощности в часы максимальных нагрузок. Наибольший эффект от использования малых ГЭС при этом следует ожидать в отдаленных сельских районах, где отсутствует линии электропередач или энергоснабжение осуществляется от энергосистемы, находящейся в настоящее время в критическом состоянии из-за перегрузок и выхода из строя оборудования.

В качестве основных факторов, определяющих эффективность малой

гидроэнергетики выделяются [42] ряд их преимуществ, такие как:

- относительно небольшие капиталовложения в оборудование, материалы, производство строительного-монтажных и пусконаладочных работ;
- отсутствие необходимости в строительстве высоковольтных линий электропередачи и мощных трансформаторных подстанций;
- возможность создания местных, локальных энергосистем с низкими эксплуатационными издержками;
- возможность реализации проектов с привлечением государственных и частных кредитов;
- незначительное воздействие на окружающую среду.

В качестве одного из первых шагов в реализации мероприятий по развитию малой гидроэнергетики в Республике можно рассматривать реконструкцию существующих малых ГЭС. Это каскад из 8 станций Аламединских ГЭС и Кеминская ГЭС. Общий вид одной из станций этого каскада представлен на рисунке 1.1.

Каскад Аламединских ГЭС, входящий в состав АО «Чакан ГЭС», состоит из восьми малых гидроэлектростанций с суммарной мощностью 30 МВт.

Семь станций из этого каскада расположены на ирригационных каналах, шесть из которых - Аламединском канале.



Рис. 1.1. Малая ГЭС на р. Аламедин

Семь станций расположены на окраине г. Бишкека, а восьмая - в 60 км от г. Бишкека. Кеминская ГЭС расположена на реке Чу в поселке Кемин, в 90 км восточнее г. Бишкека. Калининская ГЭС расположена на реке Кара-Балта в

селе Сосновка в 70 км западнее г. Бишкека.

Гидротехнические сооружения этих станций в настоящее время полностью днища заилены или частично разрушены. Гидромеханическое, гидросиловое и электротехническое оборудование практически отсутствует. Использование современного оборудования для восстановления малых ГЭС позволит, при некотором увеличении себестоимости электроэнергии, получить приемлемые результаты при эксплуатации станций и по возврату вложенных средств.

Перечень станций, предлагаемых для первоочередного восстановления, включает 24 станции с общей установленной мощностью 20,7 МВт и среднегодовой выработкой электроэнергии около 90 млн. кВтч [128].

Перспективными с точки зрения строительства малых гидроэлектростанций рассматриваются такие магистральные каналы, как обводной Чуйский, Восточный БЧК, Западный БЧК, Карателинский, Лукьяновский. Суммарный энергопотенциал этих каналов пока не определен.

В целом, строительство малых ГЭС на водохозяйственных объектах требует детальных проработок с согласованием режимов их работы.

В настоящее время, согласно утвержденной Правительством Республики **«Национальной энергетической программе Кыргызской Республики на период до 2025 г.»** ведется работа по формированию комплекса мероприятий по развитию малой гидроэнергетики Республики

Кроме того, в материалах Национальной стратегии сокращения бедности, Долгосрочной энергетической стратегии предусмотрена поддержка со стороны Правительства Кыргызской Республики, местных администраций, а также Всемирного банка, Азиатского банка развития, Европейского банка реконструкции и развития всех этих мероприятий.

Для реализации «Программы развития малой гидроэнергетики в Кыргызской Республике на период до 2005 г.» в республике было создано АО «Чакан ГЭС».

Немаловажным фактором успешной реализации планов развития малой

гидроэнергетики станет привлечение средств и ресурсов местных органов самоуправления к гражданским строительным работам и сооружению малых ГЭС.

В связи с повышением интереса к малым ГЭС необходимо учитывать не только технические и экономические, но в первую очередь, экологические и социальные аспекты энергоснабжения различных территорий. Общеизвестно что создание плотин крупных ГЭС вносит существенные изменения во взаимосвязи реки с окружающей средой, в то время как гидроузлы малых ГЭС осуществляют минимальное воздействие на окружающую среду.

Положительным фактором строительства малых ГЭС является также первоочередность сооружения гидроузлов с наращиванием электрической мощности, определяемой водопотреблением региона, и с соответствующим поэтапным распределением капитальных вложений.

Дополнение существующей энергосистемы малыми ГЭС значительно повышает надежность энергоснабжения отдаленных горных районов, где возможны аварии ЛЭП из-за схода лавин и обвалов, позволяет более эффективно использовать гидроэнергетический потенциал рек и водотоков, а также соответствует курсу сбережения дорогостоящего органического топлива и требованиям трудосберегающей политики в горных районах.

Для обеспечения эффективной деятельности новой отрасли энергетики, основанной на использовании малых и микроГЭС, необходимо решение следующих организационно-технических задач:

- завершить разработку *«Схемы развития малых ГЭС»* в Республике;
осуществить разработку технико-экономических обоснований, бизнес планов, технических проектов.
- подготовить предложения по цене и тарифообразованию, а также по созданию приемлемых условий привлечения внутренних и внешних инвесторов;
- подготовить предложения и внести на рассмотрение Правительства *Кыргызской Республики* проекты Постановлений и решений,

обеспечивающих государственную поддержку отрасли в период ее становления;

- разработать положения по Порядку взаимоотношений с местными администрациями (водопользование, отвод земель, аренда, привлечение рабочей силы к строительству и восстановлению малых ГЭС и т.д.), а также по условиям взаимоотношений с предприятиями-владельцами электрических сетей и производителями электроэнергии для обеспечения транзита электроэнергии и беспрепятственного доступа к любым потребителям;
- определить возможности экспорта электроэнергии за пределы *Кыргызской Республики*.

Осуществление намечаемых мер по развитию малой гидроэнергетики позволит уменьшить нагрузку на энергосистему, создаст условия для качественного и надежного регулирования, и управления процессом производства и распределения электроэнергии, особенно, в отдаленных высокогорных и сельских районах, значительно ослабит зависимость их от поставок дорогостоящего топлива, а также обеспечит электроэнергией сельскохозяйственные предприятия. Фермерские хозяйства, насосные станции, орошающие поля сельскохозяйственных культур.

1.3 Обобщение опыта использования микроГЭС

Не смотря на достаточно высокий гидропотенциал Кыргызской Республики и возможности его использования, как было показано ранее, пока он еще используется недостаточно эффективно. Если за счет строительства крупных ГЭС сегодня страна вырабатывает более 95% всей электроэнергии, то доля малых ГЭС и микроГЭС ничтожно мала.

Наиболее интенсивное развитие малых ГЭС пришлось на период 50-70-х годов прошлого столетия, когда они являлись основными поставщиками электроэнергии для промышленности, сельского хозяйства и бытовых потребителей. Дальнейший технический прогресс и развитие энергетической

отрасли привел постепенно к необходимости строительства крупных ГЭС, что обеспечивало возможности международной интеграции электрических сетей, обеспечения надежности функционирования за счет взаимных перетоков мощностей и тем самым высокую устойчивость и надежность работы всего электроэнергетического комплекса не только отдельно взятой республики, но и в целом еще тогда Советского Союза.

В этот период актуальность и перспективность строительства и эксплуатации малых ГЭС отпала, и они постепенно канули в прошлое.

Однако в последние десятилетия бурное развитие современных технологий преобразования и передачи энергии, активное развитие систем управления энергетическими комплексами, развитие цифровых технологий, рост приборостроения, современные интернет-технологии, нанотехнологии практически привели к революционным преобразованиям в электроэнергетике, в том числе к концепции производства, передачи и потребления энергии. Оказалось, что традиционные системы электроснабжения, основанные на строительстве крупных производителей энергии, высоковольтных линий передач и затем подача потребителям за счет распределительных сетей не конкурентоспособна с современными смарт-грид системами (умные сети).

Определенный отпечаток на все это наложила возникшая проблема охраны окружающей среды, и борьба с глобальным потеплением, которая потребовала на основе современных технологий найти возможности чистых источников энергии солнца, ветра, биомассы, в том числе и гидроэнергетики.

Анализ современного развития гидроэнергетики показывает, что большой уклон в его развитии происходит в использовании малых, небольших гидростанций, которые бы имели возможность обеспечить электроэнергией автономные малоэнергоемкие потребители.

Учитывая сложившиеся обстоятельства и возникшую актуальность в развитии малой гидроэнергетики в последние десятилетия привели к активным научным исследованиям в этой области и широкому производству,

и практическому использованию в республике малых ГЭС. Так в 70-80х годах прошлого столетия Институтом водоавтоматики и метрологии были проведены исследования по созданию стационарных микроГЭС мощностью от 100 Вт до 1 кВт не только для электроснабжения бытовых маломощных потребителей, но и для питания приводных двигателей, используемых для регулирования водных потоков в ирригационных каналах [129]. Автором этих исследований и разработчиком был д.т.н. Токомбаев К.А.

В последующем параллельно с этими работами комплексные исследования были проведены в Кыргызском научно-исследовательском отделе энергетики Кыргызской Республики, где впервые были разработаны конструкции высоконапорных микроГЭС мощностью 1,5 кВт. Разработанные конструкции этих микроГЭС были освоены заводом имени В.И. Ленина и выпущена опытная партия 100 шт. для республики [105]. Ряд образцов этих микроГЭС были экспортированы в Республику Куба, где были проведены их промышленные испытания.

Дальнейшее развитие малой гидроэнергетики было осуществлено в рамках государственной программы «КУН». Реализация этой программы осуществлялась в тесном сотрудничестве институтов Национальной Академии Наук республики, отраслевых и ведомственных учреждений, в том числе промышленных предприятий, как завод «Ореми» и АО «Энвод».

Активное участие в исследовании и разработке этих типов микроГЭС принимали д.т.н. проф. Обозов А.Д., д.т.н. Токомбаев К.А., специалисты – инженеры Морозов П.А., Мелешко А. и др. [106]

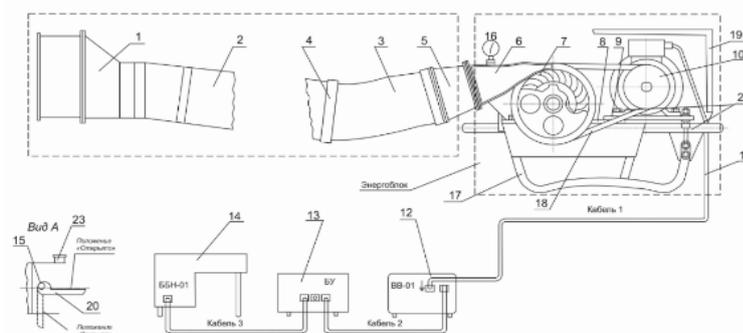


Рис.1.2. Микрогидроэлектростанция типа МГЭС 1.5У1

1- Водозаборник; 2-переходник с заслонкой; 3-рукав; 4-хомут; 5- переходник; 6-направляющий аппарат; 7-турбина; 8,9-плита; 10-управления; 11-кабель; 12-блок возбуждения; 13-блок управления; 14-блок балластных нагрузок; 15,21,22-винт; 16-манометр; 17-рама; 18-ремень;

Рукавные переносные микроГЭС «Шарбулак» были освоены на промышленном заводе «Энвод». Основное предназначение этих микроГЭС было электроснабжение небольших автономных потребителей, осуществляющих сезонный режим работы (чабаны, охотничьи хозяйства, лесхозы, лыжные базы и т.д.). Эти микроГЭС нашли широкое применение в республике. Заводом «Ореми» были освоены стационарные микроГЭС более большой мощности – это 5, 16 и 30 кВт. Эти установки также являлись высоконапорными и в основном предназначены работать в высокогорных и предгорных районах, где имеются достаточно большие уклоны местности для получения соответствующих напоров воды.



Рис.1.3. Микрогидроэлектростанция «Шар-Булак 1,0»

В последующем при поддержке международных организаций ПРООН, ГТУ, АБР и др. был реализован ряд проектов по тиражированию различных типов микроГЭС других компаний в условиях Кыргызской Республики [128].

Накопленный опыт исследований и эксплуатации рассмотренных типов микроГЭС показал, что они существенным образом отличаются друг от друга как по конструктивному решению, так и по производимой мощности [102].

В зависимости от назначения принимаемые технические решения отдельных узлов и деталей микроГЭС имеют свои преимущества и недостатки. Однако одним из общих недостатков всех этих типов микроГЭС является их ограниченность в применении. Данные микроГЭС хороши только в условиях горной местности, когда имеются достаточно большие уклоны местности и требуемый напор водного потока можно получить при достаточно малой протяженности напорного трубопровода. В противном случае эффективность этих установок резко снижается и их использование уже в равнинных зонах не эффективно и экономически нецелесообразно. Дело в том, что этот класс микроГЭС в основном преобразует потенциальную энергию давления столба жидкости закрытого трубопровода, а величина составляющей скоростного напора значительно мала. Эти условия, как правило, предусматривают использование высоконапорных скоростных турбин, которые в условиях равнинной местности недостаточно эффективны [53].

В практике же, особенно для стран с равнинной местностью, требуются совершенно другие типы микроГЭС, которые бы работали на других принципах преобразования энергии водного потока и, как следствие, это требует совершенно новых подходов в их проектировании и эксплуатации.

В Кыргызской Республике существует достаточно много автономных потребителей, расположенных в предгорных и долинных зонах, нуждающихся в электроснабжении и достаточно далеко расположенных от централизованных электрических сетей, протяжка которых к данным потребителям экономически невыгодно. В этих случаях следует отдавать предпочтение автономным генераторам электроэнергии на основе так называемых равнинных, низконапорных микроГЭС.

В последние годы активное развитие получили такие типы микроГЭС. По ряду своих свойств они имеют преимущества над известными высоконапорными микроГЭС. Так, например, эти микроГЭС могут быть установлены непосредственно в створе рек и каналов и не требуют дорогостоящих сооружений, как деривационные каналы, напорные

трубопроводы, специальные инженерные сооружения для укрепления и установки микроГЭС [115]. Малые скорости прохождения воды через турбинную камеру не препятствуют прохождению через нее рыбы, а возникновение поверхностных завихрений в турбинной камере водного потока обеспечивает насыщение кислородом воды в реке и возможность работы микроГЭС в зимний период. Дело в том, что эти завихрения позволяют удерживать температуру воды положительной в центре водотока, где расположена турбина, а обледенение происходит на периферии.

Специфика работы таких микроГЭС требует соответственно иного научного подхода в выборе типа турбины, расчета ее геометрических, кинематических, так и гидродинамических параметров, решение вопросов оптимальной компоновки конструкций микроГЭС и создания системы управления с учетом технологических схем расположения их на поверхности створа реки.

Рассмотрим ниже некоторые наиболее распространенные схемы и конструкции наплавных равнинных микроГЭС, используемых в мировой практике. Преимущества по сравнению с построенными классическими большими гидроэлектростанциями. Анализ и обобщение опыта наплавных микроГЭС

Одними из наиболее распространенных наплавных микроГЭС являются так называемые свободнопроточные микроГЭС [3].

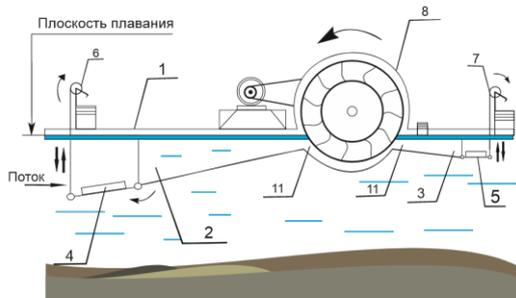


Рис.1.4. Свободнопроточные микроГЭС.

Принципиальным отличием этой микроГЭС от классической является использование в своей работе не потенциальной энергии водного потока, а кинетической энергии (скоростного напора). Иногда их еще называют бесплотинными, но это не совсем правильно, так как известны и классические типы ГЭС, не имеющие традиционные плотины. Принцип работы такой микроГЭС достаточно прост. Рабочее колесо, помещенное в водный поток, вращает вал, на котором сидит генератор, вырабатывающий электрическую энергию. Не смотря на свою простоту они не нашли своего широкого распространения в практике в силу низкого к.п.д. 50-60% и недостаточной эффективности использования скоростного потока без какого-либо водного напора. Для повышения их эффективности требуется разработка специальных турбин со своей геометрией или же турбин с большими размерами лопастей, что не всегда практически возможно.

Для избегания этого недостатка в практике появились так называемые погружные микроГЭС, лопасти которых полностью погружены под воду, что позволило улучшить его технико-экономические показатели. Однако возможность их широкого распространения была ограничена в связи с необходимостью их установки в каналах и реках с достаточно большой глубиной, которых, как правило, в равнинной местности немного.

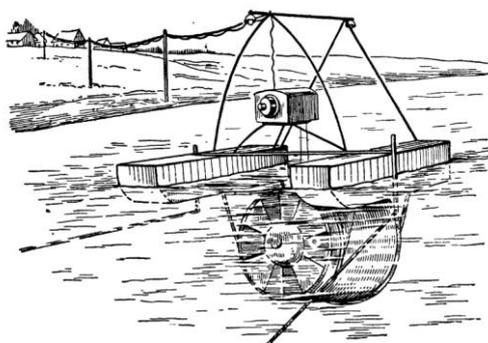
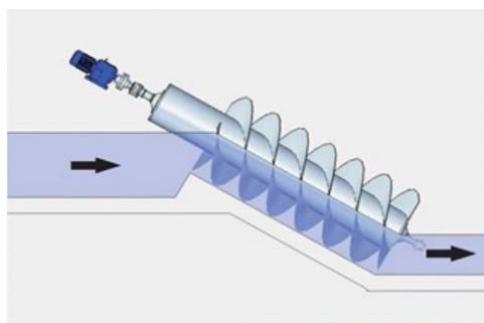


Рис.1.5. Цельнометаллическая заводского изготовления свободнопоточная гидроэлектростанция с пропеллерной турбиной конструкции К.Ф. Костина.

Анализ подобного класса микроГЭС показал, что такой тип установок имеет невысокий к.п.д., достаточно металлоемкий, сложен в эксплуатации, и в силу этих причин неконкурентоспособен с другими типами наплавных микроГЭС.

Другим достаточно распространенным типом микроГЭС являются так называемые шнековые микроГЭС [130]. Шнековые микроГЭС, как правило, работают на малых реках, ирригационных каналах и ручьях с небольшими расходами и перепадом воды.



а)



б)

Рис.1.6. Шнековые микроГЭС.

Работает установка следующим образом. В подготовленный желоб устанавливается винтовой шнек, через который пропускается вода. Под действием гравитационных сил вода устремляется по наклонному желобу вниз и взаимодействует с витками шнека и вращает его. Вращение последнего передается на вал электрогенератора, который вырабатывает электрическую энергию. В отличие от вышеописанной свободнопоточной микроГЭС, шнековые установки обладают большим к.п.д. и имеют ряд преимуществ, как простота конструкции и обслуживания, низкая стоимость оборудования, устойчива к наводнениям, экологическая безопасность за счет свободного прохождения рыб через сооружение и другие. Однако одним из основных недостатков такой установки является необходимость специального сооружения для установки шнека и, как правило, это приводит к неоправданному удорожанию ее строительства и невысокому технико-экономическому эффекту.

Известны в практике использования на реках с малым уклоном погружные микроГЭС (рис.1.7), которые также можно отнести к установкам, работающим в основном за счет скоростного напора воды [11]. Отличительной особенностью таких микроГЭС является их компактность. Они могут быть установлены практически на любых каналах и водотоках. Конструкции их достаточно просты и не металлоемки. Практически не требуют дополнительных вспомогательных устройств. Обычная глубина реки для ее установки не превышает 1 м. Как правило, такие установки заглублены в реку и крепятся растяжками к берегу.



Рис.1.7. Погружной микроГЭС.

В зависимости от мощности такая станция может быть использована как для автономных малых потребителей, так и подключена к местной электрической сети. Как правило, конструкции таких станций выполняются блочного типа, что облегчает их сборку, эксплуатацию и ремонт.

В последние годы широкое распространение стали получать низконапорные наплавные гидроэлектростанции (рис.1.8), в особенности для получения электроэнергии для автономных потребителей [4, 105]. Отличительной чертой этих установок является возможность их расположения непосредственно на поверхности реки без какого-либо дополнительного сооружения подводного или отводного канала, а также сооружений, обеспечивающих ее работу. В большинстве своих случаев они устанавливаются на плавучих понтонах непосредственно в пойме реки, что обеспечивает простоту ее установки и эксплуатации. К недостаткам конструкции следует отнести необходимость установки мультипликатора между гидротурбиной и электрогенератором, чтобы обеспечить увеличение

числа оборотов на генераторе, что естественно приводит к удорожанию конструкции и снижению ее к.п.д.

В практике существует достаточно большое разнообразие конструкций

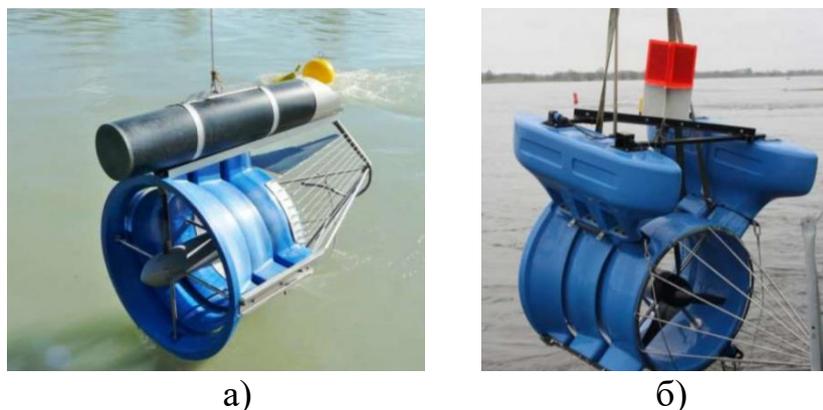


Рис.1.8. Наплавной МикроГЭС на плавучих понтонах.

данного класса микроГЭС [Лит-ра. Патенты]. Всем им присущи эти недостатки.

Для избегания этих недостатков были разработаны и созданы новые типы низконапорных микроГЭС. Это так называемые гравитационные микроГЭС [115]. Впервые такой тип микроГЭС был предложен австрийским ученым Францом Цотлетерером [131].



Рис.1.9. Гравитационный микроГЭС.

На фото рис.1.9. приведена принципиальная схема этой гидростанции. Установка состоит из водного резервуара в виде цилиндрической емкости, которая может быть изготовлена из металла или бетона, расположенной в ней гидротурбины, электрогенератора и 2-х отверстий, сделанных в верхней и нижней части цилиндра.

Работает установка следующим образом. В расположенную цилиндрическую емкость непосредственно в створе реки с верхней части, по

касательной к ее образующей поступает поток воды. Под действием скоростного напора водотока, поступающая вода в цилиндр закручивается. Установленная в ней гидротурбина со своими лопастями под действием этого потока вращается. Вращение лопастей турбины через вал подается на ротор электрогенератора, который вращаясь, вырабатывает электроэнергию.

Отработанная вода через нижнее отверстие вытекает обратно в русло реки. Подобная конструкция оказалась очень удачной не только с точки зрения ее экономической эффективности, но и достаточно высокого коэффициента преобразования энергии водного потока в электрическую. к.п.д. установки Цотлетерера была доведена до 78%. Помимо этих технических достоинств работа такой установки обеспечивала не только отсутствие вмешательства в речную и водную жизнь рыб и микроорганизмов, но и обеспечивала дополнительную аэрацию воды (насыщение ее кислородом). Образование водяной воронки в турбинной камере приводит к появлению дополнительных сил, обусловленных кориолисовым ускорением и, как следствие, изменению скорости потока воды по высоте камеры. Вследствие условия неразрывности водного потока и постоянства изменения количества движения скорость потока увеличивается сверху вниз и достигает своей максимальной величины в нижней части камеры на выходе из выпускного отверстия. Эти особенности кинематики потока жидкости привели к появлению так называемых каскадных турбин, когда на одну ось вала устанавливаются несколько турбин с различными геометрическими параметрами, обеспечивающих большой отбор мощности. При этом иногда для увеличения этого эффекта используется не цилиндрическая, а коническая камера. Однако, несмотря на свои преимущества, данный класс микроГЭС также имеет свои недостатки. В первую очередь, это необходимость установки дополнительных лотков для подвода воды и ее отвода через нижнее отверстие. Во-вторых, практически не решена проблема избавления в конструкции микроГЭС мультипликатора, обеспечивающего увеличение частоты вращения ротора электрогенератора.

Одним из решений, позволяющего избежать второго недостатка, явилась разработка принципиально нового класса низконапорных микроГЭС – это так называемые бироторные гидрогенераторы [2]. Теория расчета и разработки научно – обоснованных методов проектирования таких установок ведется группой кыргызских ученых во главе с д.т.н., проф. Обозовым А.Д.

Принципиальная схема такой бироторной микроГЭС приведена на (рис.1.10).

МикроГЭС работает следующим образом. Под воздействием гидравлического потока направляющий аппарат 1 направляет водяной поток на первую гидротурбину 2, под действием которого через жестко закрепленный с ним вал он вращает ротор 2 генератора. Причем направляющий аппарат выполнен таким образом, чтобы поступающий водяной поток на лопасти первой турбины входил по касательной к ее поверхности, т.е. обеспечивал безударный вход, чтобы обеспечить максимальный момент вращения.

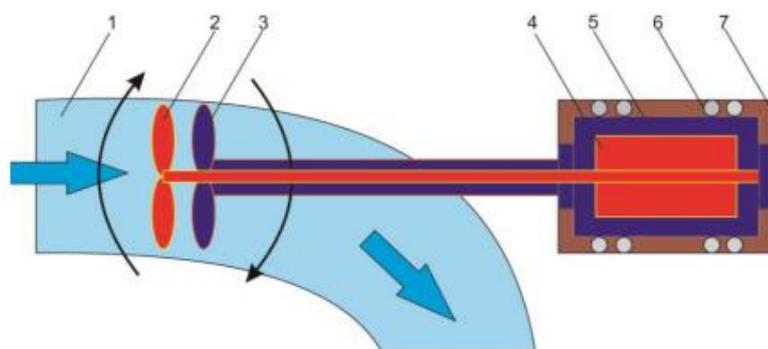


Рис.1.10. Принципиальная схема бироторной микроГЭС.

1 – подводящий трубопровод; 2 – первая гидротурбина; 3 – вторая гидротурбина; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – подшипники; 7 – корпус.

После взаимодействия с первой турбиной, через определенный промежуток водяной поток взаимодействует со второй турбиной 3, у которой профиль расположенных на ней лопастей имеет противоположную ориентацию по отношению к первой, в результате чего она вращается в противоположную сторону. Вторая турбина также жестко соединена, но уже не с генератором, а статором. В предлагаемой конструкции, в отличие от

известных, когда статор закреплен неподвижно, в данном случае он является подвижным относительно корпуса микроГЭС и установлена на подшипниках б. Таким образом происходит одновременное вращение ротора и статора в противоположные стороны, что практически обеспечивает 2-х кратное относительное увеличение частоты вращения статора относительно ротора. При таком подходе при соответствующем подборе лопастей турбины и расчета его геометрических параметров без использования мультипликатора можно увеличить число оборотов генератора.

Таким образом, проведенный обзор и анализ опыта разработки и создания наплавных микрогидроэлектростанций показывает, что на сегодня имеется достаточно большое их разнообразие. Эти микроГЭС в настоящее время вызывают все больший интерес практики для их использования на реках и каналах, расположенных в предгорных и равнинных зонах для электроснабжения маломощных автономных потребителей.

Из приведенных материалов можно также видеть, что наличие большого разнообразия конструкций обусловлено с различными особенностями их применения и эксплуатации, в том числе и требованиями, предъявляемыми реальными потребителями и гидрогеологическими особенностями водотоков.

Каждая из них имеет свои недостатки и преимущества, о которых мы писали выше. Однако следует отметить, что все они практически обладают одним общим недостатком – необходимостью осуществлять строительство или предусматривать в конструкции микроГЭС различные дополнительные приспособления для установки ее в створе реки и обеспечения отвода части воды из реки для работы микроГЭС. Это все в конечном итоге приводит к удорожанию стоимости микроГЭС и, как следствие, к снижению ее эффективности.

В данной работе предлагается принципиально новый подход в создании рассматриваемых микроГЭС такого класса, как низкопотенциальные наплавные микроГЭС, которые были бы лишены этих недостатков.

1.4 Синтез и описание принципиальной схемы наплавной микроГЭС

Для решения поставленной задачи нами была разработана и предложена принципиально новая конструкция наплавной микроГЭС, схема которой приведена на (рис.1.11). На данную конструкцию был получен патент [11]. Суть предложенной конструкции установки заключается в следующем. Конструктивно гидротурбина микроГЭС состоит из 2-х водяных колес, расположенных на вертикальной оси друг над другом, которые имеют возможность самостоятельно вращаться в различные стороны при одном и том же направлении водного потока. Основными элементами конструкции микроГЭС являются: 1 – корпус, на котором крепятся все основные элементы установки; 2 – электрогенератор с подвижным ротором и подвижным статором; 3 – бак-поплавок, обеспечивающий возможность удерживать на плаву всю конструкцию микроГЭС; 4 – радиально-напорные подшипники, обеспечивающие взаимное скольжение валов статора и ротора; 5 – ребра жесткости рабочих колес (турбины) микроГЭС; 6 – плоскость круга рабочего колеса; 7 – подкрылки вращающихся лопастей турбины, обеспечивающие соответствующее направление водного потока; 8 – непосредственно лопасти турбины; 9, 10 – соответственно вращающиеся валы ротора и статора, передающие вращающий момент от гидротурбины к электрогенератору; 11 – разделительная пластина, обеспечивающая автономное попадание водного потока на соответствующую турбину; 12 – подшипник; 13 – опорные стержни конструкции корпуса, обеспечивающие жесткую связь бака – поплавка, разделяющую пластину с защитным кожухом донной части установки; 14 – защитная металлическая сетка, обеспечивающая защиту установки от посторонних предметов, находящихся в водном потоке.; 15 – донный опорный наконечник, обеспечивающий надежную фиксацию конструкции микроГЭС на дне водотока.

Конструктивными особенностями рассматриваемой микроГЭС см. рис.11. является наличие двух вращающихся водяных колес (турбин), посаженных каждый на свой вал. Причем верхнее колесо закреплено на полом

валу, через который проходит внутренний вал нижнего колеса. Между валами расположены радиально – опорные подшипники, обеспечивающие их вращение относительно друг друга. Выше верхнего рабочего колеса установлен бак-поплавок, обеспечивающий жесткость опорной части конструкции микроГЭС с помощью вертикальных стержней, соединяющих между собой верхний разделительный и нижний защитный кожухи, связанные с металлической сеткой. Поплавок также может быть использован для регулировки глубины расположения конструкции микроГЭС в зависимости от уровня водного потока.

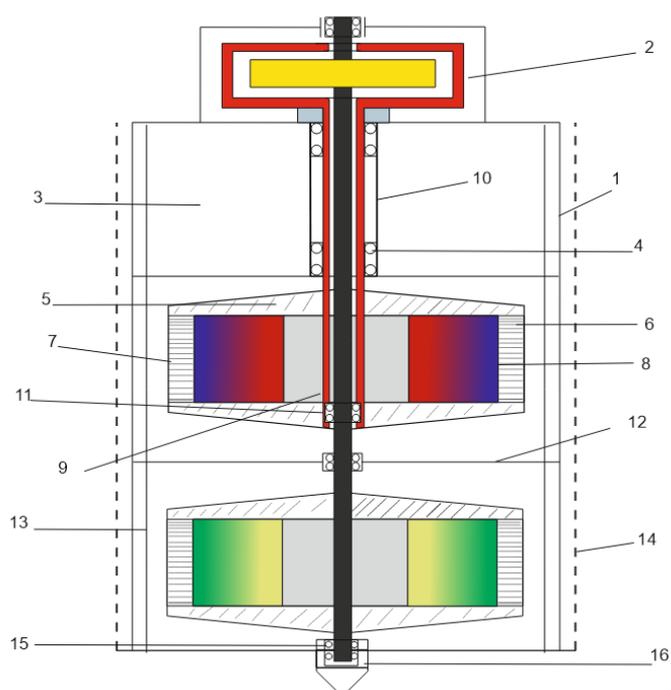


Рис.1.11. Принципиальная конструктивная схема поплавковой микроГЭС.

1 – корпус; 2 – электрогенератор; 3 – бак-поплавок; 4 – радиально-опорный подшипник; 5 – ребро жесткости рабочего колеса; 6 – плоскость круга рабочего колеса; 7 – фиксированный предкрылок; 8 – крылья; 9 – внутренний цельный вал нижнего рабочего колеса; 10 – внешний полый вал рабочего колеса; 11 – внутренний радиально-опорный подшипник; 12 – разделительная плоскость рабочих колес; 13 – стержень, что скрепляет по вертикали бак-поплавок с плоскостью рабочих колес и защитной плоскостью нижнего рабочего колеса; 14 – защитная металлическая сетка гидравлического

двигателя; 15 – защита гидравлического двигателя; 16 – донный опорный наконечник.

Обечайка рабочих колес с внешней стороны имеет ребра жесткости, которые между вращающимися валами и внешней окружностью рабочих колес. Ребра жесткости каждого из рабочих колес повторяют форму поверхности крыльчаток лопастей.

Конструкция водяных турбин выполнена в виде многолопастного колеса, имеющего основные рабочие лопасти и вспомогательные крыльчатки,

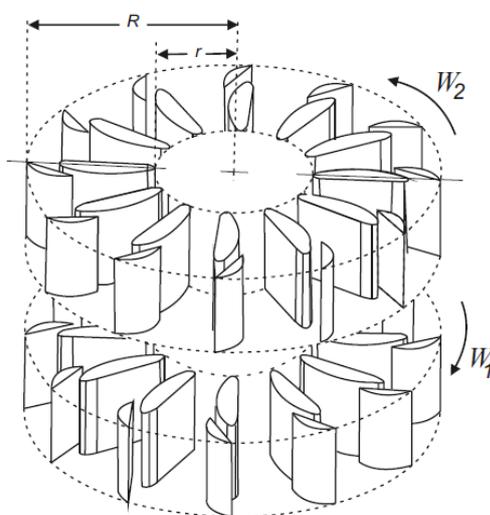


Рис.1.12. Конструктивная схема водяных турбин с основными лопастями и подкрылками.

которые расположены по периметру последовательно один за другим (рис.1.12). Каждое рабочее колесо имеет в середине вертикально установленные лопасти так, что их хорды лежат на радиусах колец: передние кромки лопастей с фиксированными крыльчатками находятся в конце большого радиуса кольца R , а задние концы крыльев – в конце малого радиуса r . Лопасти расположены по кольцу последовательно одно за другим так, чтобы впереди выпуклой части лопасти шла нижняя поверхность следующей лопасти в каждом из рабочих колес, жестко крепятся и фиксируются с крыльчатками и их соответствующими валами вращения.

Под воздействием водного потока, рабочие лопасти вращаются в разные стороны: верхнее – против часовой стрелки, а нижнее – по часовой стрелке.

Схема взаимодействия сил, возникающих в процессе работы установки приведено на (рис.1.13)

Криволинейность определяется радиусом круга рабочего колеса, проведенного из любой точки плоскости круга в направлении от его центра до периферии по часовой стрелке для верхнего рабочего колеса, что вращается по часовой стрелке, и против часовой стрелки, и против часовой стрелки для нижнего рабочего колеса, что вращается по часовой стрелке.

Как известно, при взаимодействии турбины с водным потоком возникают гидродинамические силы P , Y , Q . В данном случае и на подкрылки действуют силы P' , Y' , Q' .

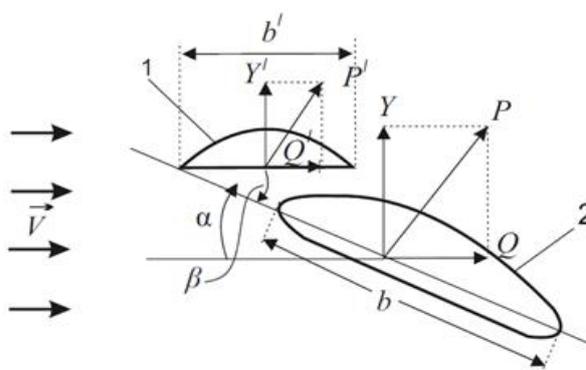


Рис.1.13. Схема взаимодействия сил гидропотока с лопастями турбины. 1 – лопасть; 2 – подкрылки.

На приведенной схеме соответственно показано: b – хорда профиля лопасти – это линия, соединяющая две наиболее отдаленные точки профиля лопасти; P – полная гидродинамическая схема, результирующая всех сил давления и вязкости (водного потока); Y – гидродинамическая сила – это проекция полной гидродинамической силы на перпендикуляр к вектору скорости набегающего водного потока; V – вектор скорости набегающего водного потока на крыло; α – угол атаки крыла – это угол между вектором скорости набегающего водного потока и хордой профиля крыла; β – угол между хордами профилей предкрылка и крыла.

Таким образом, в результате синтеза кинематической схемы турбинной части установки и рассмотрения сил взаимодействия водного потока с ее

лопастями, а также некоторые новые технические решения элементов конструкции микроГЭС позволили нам получить принципиально новое решение установки наплавной гидроэлектростанции, обеспечивающее увеличение частоты вращения электрогенератора без использования традиционных мультипликаторов, а также использовать эффект бироторной турбины применительно к классу наплавных микроГЭС. Предложенное решение и принятые в ней новые технические решения элементов конструкции наплавной бироторной микроГЭС позволили получить патент №1808, подтверждающий новизну и оригинальность установки.

Выводы по Главе I

1. Осуществлен анализ современного состояния исследований по разработке и созданию низконапорных микроГЭС для автономного электроснабжения автономных потребителей.
2. На основе изучения особенностей использования микроГЭС в условиях Кыргызской Республики и анализа потенциала малых водотоков сделана оценка актуальности и перспективности исследований, связанных с разработкой наплавных низконапорных микроГЭС.
3. Обработка данных о состоянии использования энергии малых водотоков и опыта их практического применения показала, что имеется возможность модернизации 46 малых ГЭС общей мощностью 58,8 МВт со среднегодовой выработкой 210 млн. кВт·ч и строительство около 40 малых ГЭС с установленной мощностью 128 МВт и выработкой 1,1 млрд. кВт·ч.
4. Показано, что на современном уровне развития гидроэнергетики республики имеется крайняя необходимость разработки целевой программы использования малых и микроГЭС для дальнейшего эффективного развития топливно-энергетического комплекса страны и эффективного обеспечения автономных потребителей электрической энергией.

5. Синтезирована принципиально новая схема наплавной микроГЭС, работающая на основе скоростного напора водного потока, и описан принцип ее работы.
6. Предложено новое техническое решение синтезированной микроГЭС, на который получен патент.

ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ И МАТЕМАТИЧКОЙ МОДЕЛИ НАПЛАВНОЙ МИКРОГЭС

2.1 Расчетная схема и методика выбора основных параметров гидротурбины.

Нам было показано в предыдущей главе особенностью исследуемой микроГЭС является наличие в номере 2 водяных рабочих колес (турбин) работающих самостоятельно под действием водного потока. Причем их противоположное вращение приводит к увеличению относительной частоты вращения ротора и статора в электромагнитном поле. Отсутствия каких либо специальных направляющих элементов конструкции, обеспечивающих вхождение водного потока в турбинную камеру и непосредственное размещения установки в створе реки без какой либо специальных строительных сооружений обуславливает особенность работы микроГЭС и ставить задачу разработки методов фронта и выбора и как кинематических так и динамических параметров турбины.

Для решение поставленной задачи рассмотрим расчетную схему водяных колес турбины с действующими гидродинамическими силами при набегающем на него водном потоке (рис2.1)

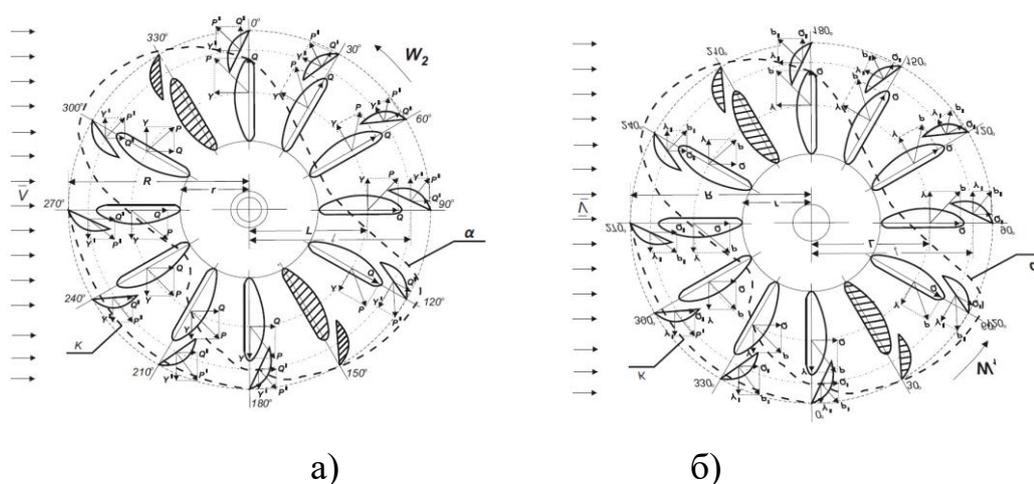


Рис.2.1. Расчетная схема водного колеса. а-верхним, б-нижнем.

Для определения крутящих моментов, возникающих на валу турбин в любой точке рабочего колеса проведем с выбранной точки круга рабочего колеса прямую линию до её оси - точки пересечения прямой с пунктирной линией покажет величину момента в данной точке, и направление его действия. Все действующий гидродинамические силы Y, Q, P, Y', Q', P' показаны во всех секторах.

В создании крутящих моментов $M_{кр}$, постоянно участвуют три силы: Сила крыла $Y_{кр}$ на плече L , сила подкрылки $Y_{подкр}$ на плече l , а также сила, что создается ребрами жесткости - показано точкой опоры K для верхнего рабочего колеса в секторе от 190 до 270° и нижнего рабочего колеса в секторе от 270 до 360° .

С учетом этих сил можем записать

$$M_{кр} = 2n(Y_{кр}L + Y_{предкр} l) + 2M_{кррк},$$

где: n - количество крыльев (подкрылков) рабочего колеса;

$$Y_{кр} = C_{Y_{кр}} * S_{кр} * 0,5 * \rho V^2 \quad (2.1)$$

$C_{Y_{кр}}, C_{Y_{подкр}}$ - коэффициенты вращающей гидродинамической силы, соответственно, основной лопасти и подкрылка;

$S_{кр}$ и $S_{предкр}$ - площадь лопасти и соответственно подкрылка.

ρ - плотность водного потока;

V - скорость водного потока;

$M_{кррк}$ - крутящий момент, создающийся ребрами жесткости рабочего колеса.

Ввиду равенства входных и выходных водных потоков, проходящих через турбину величины гидродинамических сил для левой половины верхнего рабочего колеса (левее заштрихованного профиля крыльев с подкрылками) будет равнозначным и симметричным и для его другой (правой) половины. Вычисленный крутящий суммарный момент для верхнего рабочего колеса будет по величине таким же и для нижнего рабочего колеса, но противоположным по направлению, что дает оптимальные условия для вращения валов рабочих колес.

Некоторая асимметричность круговой эпюры через гидродинамические силы, которые создаются ребрами жесткости рабочего колеса, большого значения не имеют, т.к. они имеют противоположную направленность на рабочих колесах.

Рассмотренная гидротурбины практически может быть любых размеров, иметь диаметр колеса обзора и даже более, общую площадь крыльев более 10000 квадратных метров и вращать генераторы переменного тока любой мощности - это зависит только от геометрических параметров реки - глубины, ширины и кинетической энергии водного потока. Изменяя площадь лопастей и подкрылков, их количество, радиус рабочих колес, можно получить любые мощности микроГЭС для любых автономных потребностей.

Такая рассмотренная конструкция турбины:

- обеспечивает её необходимый жесткость и надежность гидродинамических нагрузках;
- исключив отток и перетекание части водного потока с поверхность лопастей и подкрылков;
- передача крутящих моментов, осуществляется силами каждого из лопастей и подкрылков на валы турбины.
- дополнительное получение крутящих моментов от криволинейных ребер жесткости каждого рабочих колес.

Для моделирования процесса преобразования и передачи энергии от турбины к генератору необходимо знать кинематические параметры водного протока до вхождения в турбину в момент её взаимодействия с лопастями турбины и на выходе из нее. Кроме того, было показано ранее что определяющими параметрами для порождения момента на валу турбины является геометрия и форма основных лопастей и подкрылков турбины. Используя известные подходы с учетом особенностей нашей микроГЭС определим эти параметры:

Рассмотрим схему взаимодействия скоростей водного потока с лопастями турбины (рис.2.2)

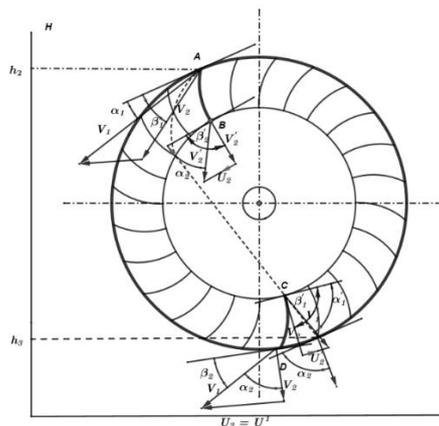


Рис.2.2. Схема взаимодействия скоростей водного потока с

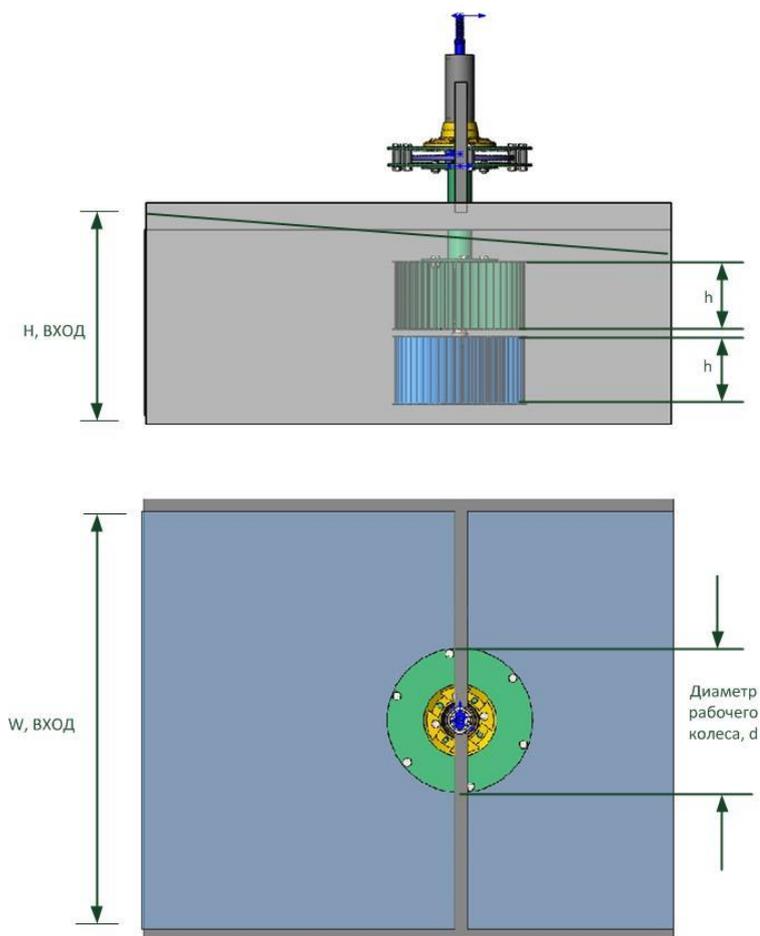


Рис. 2.3.

Рис. 2.3. Параметры При данных напоре H и расходе Q принимается наиболее оптимальные параметры: ширина канала W ; высота h_3 ; высота подводящего канала H_{inlet} ; ширина подводящего канала W_{inlet} .

D – внешний диаметр рабочего колеса

d – внутренний диаметр рабочего колеса

h – высота рабочего колеса

Где V_1 – относительная скорость воды входе, U_1 – идеальная скорость входа воды в турбине, V_{w1} – относительная скорость воды на входе; V_c – переносная скорость воды

β_2 – угол наклона лопасти; α_1 – угол атаки

Скорость вращения рабочего колеса может быть определена как [] формуле

Скорость вращения рабочего колеса:

$$N_t = \frac{39\sqrt{H}}{D}, \text{ об/мин} \quad (3)$$

Где H – водяной напор;

D – Диаметр обегайки лопастей турбины.

Относительная же скорость воды на входе составит,:

$$V_1 = \sqrt{2gH}, \text{ об/мин} \quad (4)$$

С учетом диаметра обегайки турбины(D) идеальная входная скорость в рабочем колесе может быть вычислен как:

$$U_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot N_t}{60}, \text{ м/с} \quad (6)$$

Относительная скорость воды на входе,:

$$V_{w1} = V_t \cos \alpha_1, \text{ м/с} \quad (7)$$

α_1 -угол атаки основной лопасти турбины

Переносная скорость воды:

$$V_{f1} = V_t \sin \alpha_1, \text{ м/с} \quad (8)$$

Внутренний угол наклона основной лопасти:

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{V_{f1}}{V_{w1} - U_1}\right), \quad (9)$$

Соответствующим образом можем рассчитать кинематические параметры водного потока на выходе из турбины:

Идеальная выходная скорость в турбине:

$$U_2 = \frac{\pi \cdot d \cdot N_t}{60}, \text{ м/с} \quad (10)$$

Абсолютная скорость воды на выходе:

$$V_2 = V_{f1} = V_{f2}, \text{ м/с} \quad (11)$$

Относительная скорость воды на выходе:

$$V_{w2} = V_t \cos \beta_2, \text{ м/с} \quad (12)$$

Внешний угол наклона лопасти:

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{V_{f2}}{U_2}\right) \quad (13)$$

Для расчета геометрических параметров лопастей турбиной воспользуемся известным методом композитного их представления в виде треугольников скоростей [132] (рис.2.4). Согласно представленной схеме с учетом эмпирических зависимостей, предложенных для их расчета можно записать.

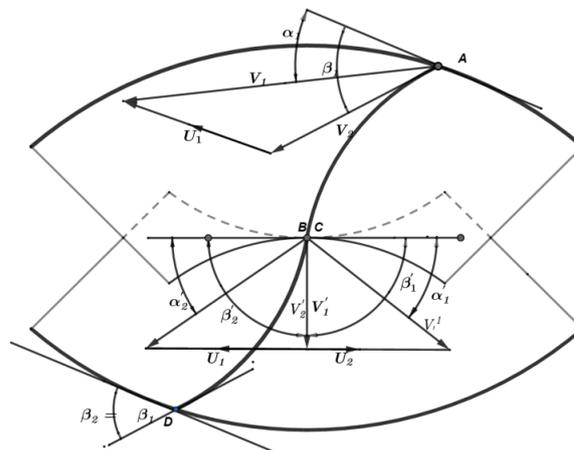


Рис.2.4. Композиционное представление треугольников скоростей

Радиус кривизны лопасти турбины, м:

$$R_{curv} = \frac{D^2 - d^2}{2 \cdot D \cdot \cos \alpha_1}, \quad (16)$$

где d – внутренний диаметр рабочего колеса.

Абсолютная длина лопасти, м:

$$L = 0,45 \cdot D, \quad (17)$$

Оптимальная толщина лопасти:

$$s_1 = k_1 \cdot D, \quad M \quad (18)$$

где k_1 – эмпирический коэффициент.

Оптимальное линейное расстояние между лопастями:

$$t = \frac{s_1}{\sin \beta_1}, \quad M \quad (19)$$

Высота лопасти:

$$\delta = k_2 L, \quad M \quad (20)$$

где $k_2 = 0,4$ – эмпирический коэффициент.

Уточненное число лопастей:

$$n = \frac{\pi \cdot D}{t} \quad (20)$$

Таким образом полученные зависимости геометрических параметров лопастей турбины и кинематические параметры водного потока позволяют осуществлять исследование зависимости выходной мощности гидротурбины от их величин и определить наиболее радиальные (оптимальные) их значения.

Механическая мощность соответственно может быть вычислена как:

$$P_{mech} = \eta_t \cdot P_{hydr}, \quad Вт \quad (21)$$

где, P_{mech} - механическая мощность турбины,

P_{hydr} - Подводимая мощность водного потока

η - к.п.д турбины.

Тогда крутящий момент на валу рабочего колеса:

$$T = \frac{60 \cdot P_{mech}}{2\pi \cdot N_t}, \quad Нм \quad (22)$$

Для комплексного решения поставленной задачи, воспользуемся известным подходом решения задачи Навье-Стокса с учетом полученных нами особенностей взаимосвязи кинематических и геометрических параметров. Решения задачи осуществим матричным способом и

используя численную реализацию на основе построения обобщенной математической модели.

2.2 Методология решения задачи матричным способом.

Для изложения методологии решения поставленной задачи ограничимся уравнениями, управляющими движением вязких, несжимаемых жидкостей для двумерной задачи u и v это скорости по направлениям x и y соответственно, и ρ является плотностью. F_x и F_y являются объемными силами в соответствующих направлениях.

Из закона сохранения массы:

$$\rho \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (3.8)$$

но из-за не сжимаемости это может быть упрощено до

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

Из закона сохранения импульса:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= F_x + \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= F_y + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

где σ_x , σ_y , τ_{xy} , являются компонентами напряжения (нормальные и касательные).

Вводя самый простой эмпирический параметр μ (молекулярная вязкость), получаем следующую форму уравнений напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -p - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \sigma_y &= -p - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

где p является давлением жидкости.

Комбинируя уравнения (3.9) к (3.11), уравнения Навье-Стокса, могут быть записаны так,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{p} F_x - \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{p} F_y - \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Вводя условия не сжимаемости, они могут быть далее упрощены до

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{p} F_x - \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{1}{p} F_y - \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для установившегося состояния (в отличие от переходных процессов) производные $\partial u/\partial t$, и $\partial v/\partial t$ могут быть отброшены, приводя к связанным уравнениям в базисных переменных, u , v , p . Уравнения не линейны из-за присутствия произведения искомой функции на ее производную u ($\partial u/\partial x$). Игнорируя объемные силы, получим следующие уравнения для установившегося состояния,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.14)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Представим искомую функцию в виде комбинации и задаваемых функций и неизвестных значений $\tilde{u} = [N] \{u\}$, $\tilde{v} = [N] \{v\}$ и $\tilde{p} = [N] \{p\}$, где $\{u\} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots]$ T, представляют узловые значения скорости u в направлении x , и т.д.

Для интегрирования при применении метода Галеркина u и v в (3.14) установлены равные константам $u = u = [N] \{u_0\}$ и $v = v = [N] \{v_0\}$, где $\{u_0\}$ и $\{v_0\}$ являются значениями скоростей в узлах (см. Главу 9).

Извлекая тривиальные решения,

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] \{u\} + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{u\} + \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial x} [N] \{p\} - \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial x^2} [N] \{u\} - \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial y^2} [N] \{u\} &= \{0\} \\ \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] \{v\} + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{v\} + \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{p\} - \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial x^2} [N] \{v\} - \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial y^2} [N] \{v\} &= \{0\} \end{aligned}$$

(3.15)

Умножение на весовые функции и интегрируя

$$\begin{aligned} & \iint [N]^T \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] \{u\} dx dx + \iint [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{u\} dx dy \\ & + \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N] \{p\} dx dy - \frac{\mu}{p} \iint [N]^T \frac{\partial^2}{\partial x^2} [N] \{u\} dx dy - \frac{\mu}{p} \end{aligned}$$

Применяя интегрирование по частям, где необходимо, и упрощая,

$$\begin{aligned} & \iint [N]^T \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] \{u\} dx dx + \iint [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{u\} dx dy + \\ & \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N] \{p\} dx dy - \frac{\mu}{p} \iint [N]^T \frac{\partial^2}{\partial x^2} [N] \{u\} dx dy - \\ & \frac{\mu}{p} \iint [N]^T \frac{\partial^2}{\partial y^2} [N] \{u\} dx dy = \{0\} \\ & \iint [N]^T u \frac{\partial}{\partial x} [N] \{v\} dx dx + \iint [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] \{v\} dx dy + \\ & \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] \{p\} dx dy - \frac{\mu}{p} \iint [N]^T \frac{\partial^2}{\partial x^2} [N] \{v\} dx dy - \\ & \frac{\mu}{p} x \iint [N]^T \frac{\partial^2}{\partial y^2} [N] \{v\} dx dy = \{0\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Применяя интегрирование по частям, где необходимо, и упрощая,

$$\begin{aligned} & \iint [N]^T \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] dx dx \{u\} + \iint [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{u\} + \\ & \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{p\} + \frac{\mu}{p} \iint \frac{\partial}{\partial x} [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N]^T dx dy \{u\} + \\ & \frac{\mu}{p} \iint \frac{\partial}{\partial y} [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{u\} = \{0\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & \iint [N]^T \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] dx dx \{v\} \\ & + \iint [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{v\} \\ & + \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{p\} \\ & + \frac{\mu}{p} \iint \frac{\partial}{\partial x} [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N]^T dx dy \{v\} \\ & + \frac{\mu}{p} \iint \frac{\partial}{\partial y} [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \{v\} = \{0\} \end{aligned}$$

Дополняем уравнения условиями непрерывности,

$$\iint [N]^T \left(\frac{\partial}{\partial x} [N]\{u\} + \frac{\partial}{\partial y} [N]\{v\} \right) dx dy = \{0\} \quad (3.18)$$

Приводя подобные неизвестные в векторы $\{u\}$, $\{p\}$, $\{v\}$, получим условия равновесия [21]

$$\begin{bmatrix} [C_{11}] & [C_{12}] & [C_{13}] \\ [C_{21}] & [C_{22}] & [C_{23}] \\ [C_{31}] & [C_{32}] & [C_{33}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

где

$$\begin{aligned} [c_{11}] &= \iint \left([N]^T \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} [N] + [N]^T \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} [N] + \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial x} [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu}{p} \frac{\partial}{\partial y} [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] \right) dx dy \\ [c_{12}] &= \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N] dx dy \\ [c_{13}] &= [0] \\ [c_{21}] &= \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial x} [N] dx dy \\ [c_{22}] &= [0] \\ [c_{23}] &= \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \\ [c_{31}] &= [0] \\ [c_{32}] &= \frac{1}{p} \iint [N]^T \frac{\partial}{\partial y} [N] dx dy \\ [c_{33}] &= [c_{11}] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Сравнивая с таблицей 3.1, получим много условий типа $N_i \partial N_j / \partial x$, которые подразумевают несимметричные структуры для подматрицы $[c_{11}]$ и т.д., таким образом необходимо применить специальные алгоритмы решения несимметричных матриц. Трехмерная задача решена в разделе, в которой w – компонент скорости по направлению z .

Таблица 3.1 Частичная дискретизация дифференциальных уравнений в частных производных

Элемент дифференциального уравнения	Типичный элемент для матричного уравнения	Симметрия
u	$\int N_i N_j dx$	Да
$\frac{du}{dx}$	$\int N_i \frac{dN_j}{dx} dx$	Нет
$\frac{d^2 u}{dx^2}$	$-\int \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx$	Да
$\frac{d^4 u}{dx^4}$	$\int \frac{d^2 N_i}{dx^2} \frac{d^2 N_j}{dx^2} dx$	Да

Упрощенные уравнения потока во многих практических случаях нет необходимости решить полную связанную систему, описанную в предыдущем параграфе. Давление p может быть исключено из (3.13) если введем определение ротора,

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.21)$$

это приводит к единственному уравнению,

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (3.22)$$

Определим функция потока ψ так

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ v &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Получаем альтернативную связанную систему, включающую ψ , и ω для условий установившегося состояния,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= \omega \\ \frac{\mu}{p} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Это имеет явное преимущество, что только два неизвестных включены, а не три, как в предыдущем параграфе. Однако решение (3.24) является все еще относительно сложным процессом, и задача потока иногда решаются через единственное уравнение (3.22), предполагая, что для u и v могут быть зависеть от одной независимой переменной. В этой форме уравнение (3.22) является примером уравнения конвекции второго порядка [22, 23].

Если нет конвекции, получающееся уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (3.25)$$

который по форме идентично известным уравнению теплопроводности или уравнению диффузии. Заключительное упрощение является сокращением к условиям установившегося состояния,

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0 \quad (3.26)$$

Получаем известное уравнение Лапласа. В следующих параграфах опишем дискретизацию в порядке увеличивающейся сложности.

Установившееся состояние, форма уравнения Лапласа [23].

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.27)$$

где ϕ является потенциалом жидкости или общим напором и k_x , и k_y являются текучестью жидкости в направлениях x и y . Процесс дискретизации сводит дифференциальное уравнение до системы линейных алгебраических уравнений равновесия вида,

$$[k_c]\{\phi\} = \{q\} \quad (3.28)$$

где $[k_c]$ является симметричной матрицей текучести, $\{\phi\}$ является вектором узлового потенциала (общий напор) значения и $\{q\}$ является вектором узловых притоков/оттоков.

Применяя дискретизацию,

$$\bar{\phi} = [N]\{\phi\} \quad (3.29)$$

Таблица 3.1 показывает, что типичные условия в матрице $[k_c]$ имеют форму,

$$\iint \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy \quad (3.30)$$

Применим удобный способ выражения матрицы $[k_c]$ в (3.28) ,

$$[k_c] = \iint [T]^T [K] [T] dx dy \quad (3.31)$$

где матрица свойств $[K]$ аналогична на матрице напряженно-деформированного состояния $[D]$ в механике твердого тела, где,

$$[K] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

(предполагая, что основные оси тензора текучести совпадают с x и y).

Матрица $[T]$ подобна матрице $[B]$ механики твердого тела (для элемента с 4 узлами),

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Подобие между уравнением (3.31) для жидкости и для твердого тела позволяет использовать аналогичные решения несмотря на то, что исходные неупрощенные дифференциальные уравнения, являются сильно отличающимися.

Наконец, стоит отметить, что (3.31) может также быть достигнуто из условий минимума потенциальной энергии.

Эквивалентное условие минимума потенциальной энергии состоит в том, что для интеграла

$$\iint \left[\frac{1}{2} k_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} k_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.34)$$

Необходимо найти минимальное значение для всех возможных $\phi(x, y)$.

Решения в качестве примера задачи установившегося состояния, описанной (3.27), даны в разделе. Трехмерные задачи также решены в разделе.

Двумерная задача установившегося ламинарного потока жидкости Как показано в (3.31), что у жидкого элемента есть матрица, аналогичная матрице жесткости в деформируемых телах, называемая

матрицей текучести в двумерной постановке,

$$[k_c] = \iint [T]^T [K] [T] dx dy \quad (3.35)$$

Матрица *deriv* содержит производные функций формы элемента относительно (x, y) , аналогичные задаче деформирования твердого тела

CALL shape_der(der,points,i)

jac = MATMUL(der,coord) (3.36)

det = determinant(jac)

CALL invert(jac)

deriv = MATMUL(jac,der) (3.37)

в то время как матрица [K] содержит параметры текучести элемента в форме

$$kay = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Численное интегрирование матрицы текучести для двумерной задачи выполняется кодом *dtkd* =

MATMUL(MATMUL(TRANSPOSE(deriv),kay),deriv)

$$kc = \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * dtkd_i \quad (3.39)$$

2.3 Решение связанных задач Навье – Стокса.

2.4 Реализация алгоритма

Для условий установившегося состояния, как это было показано в параграфе, необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений, включающих на уровне одного конечного элемента подматрицы [c11], [c12], и т.д. Эти матрицы конечного элемента содержат скорости *u* и *v* (обозначенные *u_{bag}* и *v_{bag}* в программах) вместе с функциями формы и их производными для переменных давления и скорости. Будут использованы различные функции формы для скорости (вектор) и давления (скаляр).

Функции формы для скорости обозначим *fun* и функции формы для давления обозначим *funf*. Точно так же производные для скорости

обозначим $deriv$ и производные для давления обозначим $derivf$. Массивы $nd1$, $nd2$, $ndf1$, $ndf2$, $nfd1$, и $nfd2$ содержат результаты векторных произведений векторов между скоростью и функциями формы давления и их производными как показано ниже.

Таким образом, интегралы для конечного элемента, которые должны быть получены в численной форме от уравнения (3.20) имеют форму

$$\begin{aligned}
 dtkd &= MATMUL(MATMUL(TRANSPPOSE(deriv), kay), deriv) \\
 CALL \text{cross_product} \{fun, deriv(1, :), nd1\} \\
 CALL \text{cross_product} \{fun, deriv(2, :), nd2\}
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

и далее

$$\begin{aligned}
 c11 (= c33) &= \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * dtkd_i \\
 &+ ubar_i \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * nd1_i \\
 &+ vbar_i \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * nd2_i
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

В этих уравнениях, $deriv(1, :)$ означает первую строка $deriv$ и т.д. в обычном стиле ФОРТРАНе 95. Диагональные элементы в kay представляют обратные величины числа Рейнольдса. Отметим идентичность первой подматрицы $c11$ с матрицей (3.39) для разьединенной (упрощенной) задачи потока.

Остающиеся подматрицы сформированы следующим образом:

$$\begin{aligned}
 CALL \text{cross_product} \{fun, derivf(1, :), ndf1\} \\
 CALL \text{cross_product} \{fun, derivf(2, :), ndf2\} \\
 CALL \text{cross_product} \{funf, deriv(1, :), nfd1\} \\
 CALL \text{cross_product} \{funf, deriv(1, :), nfd2\}
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

и далее

$$c12 = \frac{1}{rho} \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * ndf1_i$$

$$c32 = \frac{1}{rho} \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * ndf2_i$$

$$c21 = \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * nfd1_i \quad (3.43)$$

$$c23 = \sum_{i=1}^{nip} det_i * weights(i) * nfd2_i$$

где rho это плотность. Другие подматрицы $c13$, $c22$, и $c31$ приравнены нулю.

Несимметричную матрицу, созданную от этих подматриц, обозначаем $[ke]$, она сформирована специальной подпрограммой, обозначаемой *formupv* (*formupvw* в 3-D) и глобальная переменная, несимметричная ленточная матрица собрана с помощью подпрограммы *formtb*. Соответствующие подпрограммы решения для системы уравнения являются *gauss_band* и *solve_band* как показано в Таблице 3.2.

В разделе был описан процесс дискретизации, посредством чего дифференциальные уравнения в частных производных могут быть заменены матричными уравнениями, принимающими форму линейных и нелинейных алгебраических уравнений.

Здесь описываются алгоритмы, чтобы сформулировать и решить эти виды уравнений.

Перед этим должны быть представлены две дополнительных функции.

Таблица 3.2 Подпрограммы решения уравнений

Коэффициенты вычисляется по	Подпрограмма решения	Метод
fsparv	$\begin{cases} sparin \\ spabac \end{cases}$	Холецкий
fsparv	$\begin{cases} sparin_gauss \\ spabac_gauss \end{cases}$	Гаусс
formtb	$\begin{cases} gauss_band \\ solve_band \end{cases}$	Гаусс

Во-первых, мы до сих пор имели дело только с самыми простыми формами

элементов,

а именно прямоугольники. Очевидно, если дифференциальные уравнения должны быть решены в произвольной области, то конечным элементам тоже должны быть сформулированы для более общих форм. Это выполнено путем описания общих треугольных, четырехугольных, тетраэдральных, гексаэдральных элементов вместе с введением системы координат, локальной для конечного элемента.

Во-вторых, мы до сих пор рассматривали только единичный конечный элемент, тогда как практически применимые решения будут обычно получаются с использованием множества элементов, обычно на практике от сотен до миллионов, объединенных в узлах. Кроме того, различные типы граничных условий могут быть заданы, они накладывают дополнительные ограничения на решение.

Локальные координаты для четырехсторонних элементов рис.2.4. показывает два типа плоских 4-узловых четырехсторонних элемента. Функции формы для прямоугольника рис.2.4(a), как показывалось, были даны уравнением, а именно, $N1 = (1 - x/a)(1 - y/b)$ и т.д. В глобальных координатах (x, y) для общего четырехугольника рисунок 2.5(b) это довольно громоздко. Плоский прямоугольный элемент рис.2.5(a) и плоский непрямоугольный четырехсторонний элемент (b).

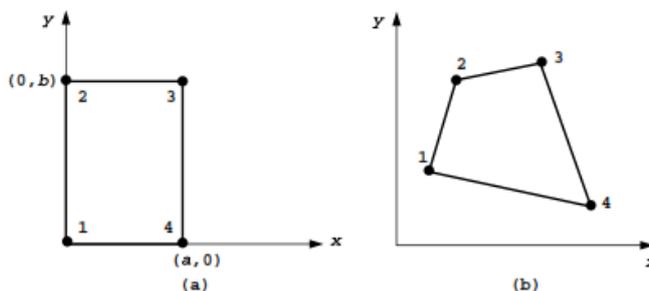


Рис. 2.5.

Алгебраические преобразования лучше всего выполнять не вручную, а с применением программных пакетов по компьютерной алгебре типа Maple [25]. Традиционно, вычисления проводятся в локальной системе

координат, как показано в рис.2.5, что первоначально было предложено в [26] и численно вычислить получающиеся интегралы. Общая точка $P(\xi, \eta)$ в четырехугольнике располагается на пересечении двух линий, пересекающих противоположные стороны четырехугольника в равных пропорциях. В связи с последующим численным интегрированием, удобней нормализовать координаты так, чтобы сторона 12 имела координату $\xi=-1$, сторона 34 имеет координату $\xi=1$, сторона 41 имеет координат $\eta=-1$, и сторона 23 имеет координату $\eta=1$. В этой системе координат пересечение средних линий противоположных сторон четырехугольника является точкой $(0,0)$, в то время как углы 1,2,3, и 4 $(-1, -1), (-1, 1), (1, 1),$ и $(1, -1)$ соответственно.

При этом, функции формы для 4-узловатого четырехугольника с угловыми узлами принимают простую форму

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \end{aligned} \quad (3.44)$$

и они могут использоваться для описания изменения неизвестных, например, перемещения в механике твердого тела или потенциалы жидкостей в механике жидкостей и газов.

Те же функции формы могут также часто использоваться для определения отношения между глобальной (x, y) и локальной (ξ, η) системами координат. Для изопараметрического элемента [27, 28] приведем пример для четырехугольника с 4 узлами. Преобразование координат,

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 = [N]\{x\} \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 = [N]\{y\} \end{aligned} \quad (3.45)$$

где $[N]$ даны согласно (3.44), $\{x\}$, и $\{y\}$ – узловые координаты.

Ранее было показано, что свойства конечного элемента включают не только

функции формы $[N]$, но также и их производные относительно глобальных координат (x, y) , которые появляются в матрицах, таких как $[B]$ и $[T]$. Далее, произведения этих величин должны быть интегрированы по области элемента или объему.

Производные легко преобразовать от одной системы координат к другой посредством правила последовательного частичного дифференцирования, лучше всего выраженного в матричной форме для двух размерностей.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

или

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (3.47)$$

где $[J]$ является матрицей Якоби. Определитель этой матрицы, $\det|J|$ обозначаемый как Якобиан, должен также быть вычислен, потому что он используется в преобразованных интегралах следующим образом:

$$\iint dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \det|J| d\xi d\eta \quad (3.48)$$

Для трехмерной задачи эквивалентные выражения аналогичны. Вырожденные четырехугольники, например, как на рис.2.6(а) обычно допустимы, однако невыпуклых четырехугольников, как показано в рис.2.6. (b) необходимо избегать, поскольку это делает величину якобиана не определенной

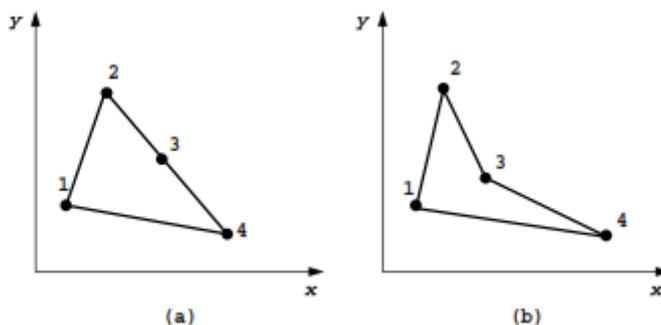


Рис.2.6. (а) Вырожденный четырех угольник (b) Недопустимый четырех угольник

Численное интегрирование для четырехугольных элементов, не смотря на то, что некоторые интегралы этого типа могут быть вычислены аналитически, это обычно громоздко для сложных функций, особенно в общем случае, когда (ξ, η) становятся криволинейными [29]. В большинстве существующих программных комплексов интегрирование проводится в численной форме, с помощью метода Гаусса с полиномом Лежандра по четырехсторонним областям [30,31]

В двумерной постановке правила для всех квадратичных форм

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) \det|J| d\xi d\eta \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \omega_j f(\xi_i, \eta_j) \approx \sum_{i=1}^{nip} W_i f(\xi, \eta) \quad (3.49)$$

где $nip=n^2$ (общее количество точек интегрирования), w_i и w_j (или $W_i=w_i w_j$) весовые коэффициенты и (ξ_i, η_j) это выбранные точки в элементе. Эти значения для n , равного 1, 2 и 3, показаны в Таблице 3.3, и заполненные таблицы доступны в других в [32]. Таблица предполагает, что диапазон интегрирования ± 1 , следовательно, применяется нормализованная (безразмерная) система координат.

Приблизительное равенство в (3.48) точно для кубических функций, когда $n=2$ и для пятеричной функции, когда $n=3$. Обычно желательно выполнить интеграцию по конечным элементам максимально точно, но при особых обстоятельствах [28] можно выполнить менее точное численное интегрирование, посредством уменьшения n , что в указанных в библиографии случаях может улучшить качество решений.

Аналитическое интегрирование для четырехугольников

Системы компьютерной алгебры, такие как "REDUCE" и "Maple" позволяют производить аналитическую обработку сложных алгебраических выражений (например, функции формы конечного элемента). Выражения могут дифференцироваться, интегрироваться,

разлагаться на множители и т.д., приводя к явным формулировкам матриц элемента, избегая потребности в стандартном численном интегрировании. Особенно для трехмерных элементов, этот подход может привести к существенной экономии процессорного времени.

Табличные 3.3 Координаты и весовые значения в формуле интегрирования Гаусса - Лежандра –для четырехсторонних элементов.

n	nip	(ξ_i, η_j)	$\omega_i \omega_j$	W_i
1	1	(0,0)	(2,2)	4
2	4	$\left(\pm \sqrt{\frac{1}{3}}, \pm \sqrt{\frac{1}{3}} \right)$	(1,1)	1
3	9(4@)	$\left(\pm \sqrt{\frac{3}{5}}, \pm \sqrt{\frac{3}{5}} \right)$	$\left(\frac{5}{9}, \frac{5}{9} \right)$	$\frac{25}{81}$
	(2@)	$\left(\pm \sqrt{\frac{3}{5}}, 0 \right)$	$\left(\frac{5}{9}, \frac{8}{9} \right)$	$\frac{40}{81}$
	(2@)	$\left(0, \pm \sqrt{\frac{3}{5}} \right)$	$\left(\frac{8}{9}, \frac{5}{9} \right)$	$\frac{40}{81}$
	(1@)	(0,0)	$\left(\frac{8}{9}, \frac{8}{9} \right)$	$\frac{64}{81}$

Но для некоторых элементов (например, шестигранник с 14 узлами, описанный позже в этой Главе), функции формы настолько сложны алгебраически, что сомнительно, без систем компьютерной алгебры их трудно обработать без ошибки человеческого фактора.

Для конечных элементов в двумерной задаче матрица текуести элемента

$$[k_m] = \iint [B]^T [D] [B] dx dy \quad (3.50)$$

В случае четырехсторонних элементов, если элемент является прямоугольным со сторонами, параллельными осям x и y , под

интегральная функция состоит из простых полиномов, которые могут быть легко интегрированы в замкнутой форме разделением переменных, приводящих к компактным условиям. В целом однако, четырехсторонние элементы приведут к очень сложным подынтегральным выражениям, которым можно вычислить только численно.

С учетом того, что Гауссова квадратура с 2 точками, где число точек интегрирования 4, приводит в большинстве случаев к достаточно точным вычислениям матрицы текучести четырехугольника общего вида с 4 узлами, компромиссный подход заключается в оценке доли в итоговой матрице текучести от каждой точки интегрирования алгебраическим путем и добавлении их вместе, таким образом:

$$[k_m] \approx \sum_{i=1}^4 W_i \det|J|_i ([B]^T [D] [B])_i \quad (3.51)$$

где $\det|J|$ является якобианом, описанным ранее.

Это, во-первых, приводит к довольно длинным выражениям, но значительное количество упрощений возможно, например, множитель $(1/\sqrt{3})$ может быть во многих случаях сокращен. Алгебраические выражения могут быть сгенерированы при помощи систем компьютерной алгебры, и риск человеческой ошибки может быть фактически устранен путем экспорта результатов в виде исходного кода на языке ФОРТРАН.

Упрощенные алгебраические выражения, формирующие матрицу текучести четырехстороннего элемента с 4 узлами, реализованы в подпрограмме *stiff4*.

Тот же метод может быть применен к другим типам конечных элементов [34] и матрицам других конечных элементов (например, четырехугольники с 8 узлами, 3-мерные элементы). Например, матрица текучести четырехстороннего элемента общего вида с 4 узлами вычислена алгебраически с помощью подпрограммы *seep4*. Подобный подход использовался для создания подпрограммы *bee8* которая генерирует

алгебраическую версию матрицы [B] для четырехугольного элемента общего вида с 8 узлами для любой местной системы координат (ξ, η) .

Местные системы координат для треугольников вводим для удобства описания так, чтобы элемент преобразовался в прямоугольный равнобедренный треугольник с единичными размерами сторон как показано на рис.2.7. Этот подход эквивалентен методу координат по области [33] в котором координата любой точки в треугольнике может быть однозначно задана с помощью локальных координат (L_1, L_2) . Для двумерной области, необходимо и достаточно только двух независимых координат. Однако, третья координата L_3 , вычисляемая,

$$L_3 = 1 - L_1 - L_2 \quad (3.52)$$

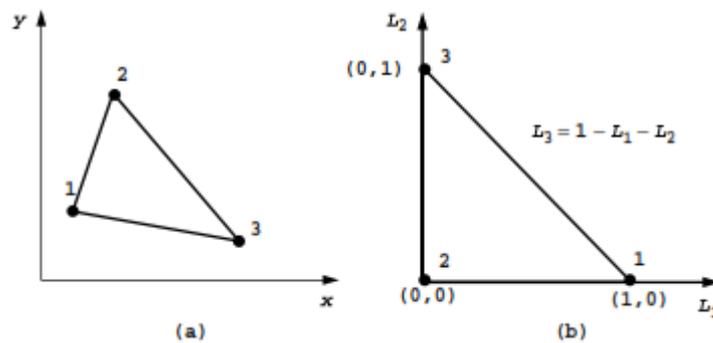


Рис.2.7. (a)Треугольный элемент общего вида (b) Местная система координат для треугольных элементов и как прежде, для изопараметрической задачи

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 = [N] \{x\} \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 = [N] \{y\} \end{aligned} \quad (3.53)$$

К уравнениям (3.46) и (3.47) из предыдущего абзаца применяются относительно матрицы Якоби, но уравнение (3.48) должно быть модифицированы для треугольников

$$\iint dx dy = \int_0^1 \int_0^{1-L_1} \det|J| dL_2 dL_1 \quad (3.54)$$

Численное интегрирование по треугольным областям подобна аналогичному для четырехугольников и принимает общую форму

$$\int_0^1 \int_0^{1-L_1} f(L_1, L_2) dL_2 dL_1 \approx \sum_{i=1}^{nip} W_i f(L_1, L_2)_i \quad (3.55)$$

где W_i является весовыми коэффициентами, соответствующими точкам выборки (L_1, L_2) , nip представляем число точек интегрирования. Формулы, включающие локальные координаты, преобразования координаты численное интегрирование, описаны далее.

nip	$(L_1, L_2)_i$	W_i
1	$\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$	$\frac{1}{2}$
3	$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$	$\frac{1}{6}$
	$\left(\frac{1}{2}, 0\right)$	$\frac{1}{6}$
	$\left(0, \frac{1}{2}\right)$	$\frac{1}{6}$

Поведение изолированного элемента простейшей формы, как показывалось, было задано матричными уравнениями, например, уравнение текучести(3.28),

$$[k_c]\{\phi\} = \{q\} \quad (3.56)$$

Описывающего установившийся ламинарный поток. Рисунок 3.13 показывает небольшую сетку, содержащую три четырехсторонних элемента, все из которых имеют параметры, определенные (3.56). Задача состоит в том, чтобы собрать элементы и тем самым получить свойства глобальной системы с 3 элементами. Каждый элемент обладает своими номерами узла, нециклическими, которые показаны в схеме на рисунке 3.9(b), а именно, нумеруя по часовой стрелке начиная с любого угла. Так как в каждом узле только одно неизвестное – потенциал потока, для каждого элемента можем составить матрицу,

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} & k_{2,4} \\ k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} & k_{3,4} \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & k_{4,4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix} \quad (3.57)$$

Однако при глобальной нумерации узлов сетки, глобальный номер 4

соответствует локальному узлу элемента 1 элемента 1 и локальному узлу 2 элемента 3. Общее количество уравнений для сетки равняется 8 и в этой системе значение $k_{1,1}$ от элемента 1 и значение $k_{2,2}$ от элемента 3 необходимо сложить, чтобы получить глобальное значение $K_{4,4}$ и т.д. элемента.

Глобальное матричное уравнение может быть записано как

$$[K_c]\{\Phi\} = \{Q\} \quad (3.58)$$

Где заглавные буквы означают, что это глобальные (собранные) уравнения.

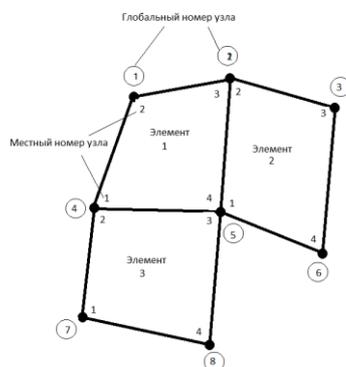


Рис.2.8. Сборка глобальной матрицы текучести

$k_{2,2}^1$	$k_{2,3}^1$	0	$k_{2,1}^1$	$k_{2,4}^1$	0	0	0
$k_{3,2}^1$	$k_{3,3}^1 + k_{2,2}^2$	$k_{2,3}^2$	$k_{3,1}^1$	$k_{3,4}^1 + k_{2,1}^2$	$k_{2,4}^2$	0	0
0	$k_{3,2}^2$	$k_{3,3}^2$	0	$k_{3,1}^2$	$k_{3,4}^2$	0	0
$k_{1,2}^1$	$k_{1,3}^1$	0	$k_{1,1}^1 + k_{2,2}^3$	$k_{1,4}^1 + k_{2,3}^3$	0	$k_{2,1}^3$	$k_{2,4}^3$
$k_{4,2}^1$	$k_{4,3}^1 + k_{1,2}^2$	$k_{1,3}^2$	$k_{4,1}^1 + k_{3,2}^3$	$k_{4,4}^1 + k_{1,1}^2 + k_{3,3}^3$	$k_{1,4}^2$	$k_{3,1}^3$	$k_{3,4}^3$
0	$k_{4,2}^2$	$k_{4,3}^2$	0	$k_{4,1}^2$	$k_{4,4}^2$	0	0
0	0	0	$k_{1,2}^3$	$k_{1,3}^3$	0	$k_{1,1}^3$	$k_{1,4}^3$
0	0	0	$k_{4,2}^3$	$k_{4,3}^3$	0	$k_{4,1}^3$	$k_{4,4}^3$

Эта система уравнений или глобальная матрица симметрична, если ее составляющие матрицы симметричны. Матрица также обладает полезным свойством ленточности, что означает, что ненулевые значения сконцентрированы вокруг ведущей диагонали, простирающейся от верхнего левого до нижнего правого углов таблицы. В этом примере ширина ленты равна

Важность оптимальной нумерации узлов сетки иллюстрирована на (рис.2.9), где нумерация в круглых скобках имеет ширину ленты 13 по сравнению с нумерацией внутри кругов с шириной ленты 2.

Если системная симметрия существует, она должна также быть принята во внимание для оптимизации хранения данных.



Рис.2.9.Альтернативные схемы нумерации узлов сетки.

Таким образом на основе изложенной методологии, основанной на решении задач Навье Стокс матричным способом был разработан алгоритм её реализации (рис.2.9) с учетом возможности использования программного продукта FORTRAN.

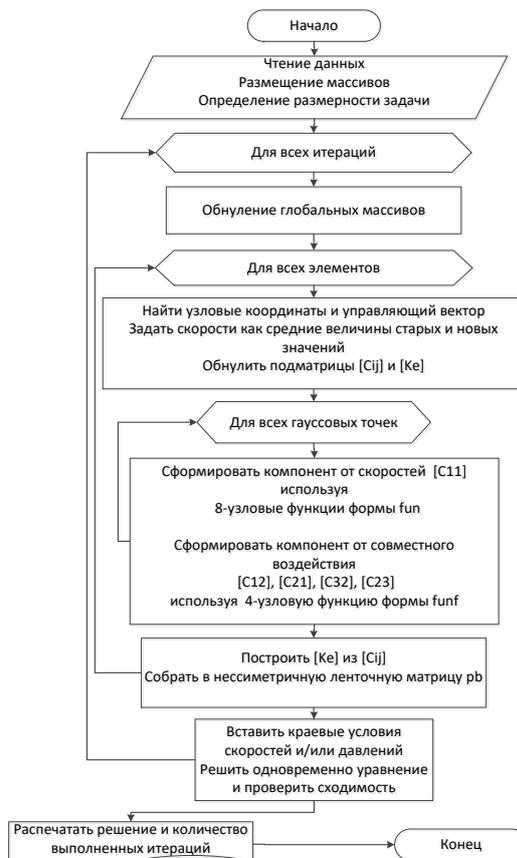


Рис. 2.10. Блок-схема программы решения задачи Навье-Стокса матричным способом.

2.5 Обобщенная математическая модель наплавной микроГЭС.

Построение обобщенной математической модели с использованием программного продукта, связана в первую очередь с построением её структурной схемы, тесно связанной с разработанным алгоритмом и полученными ранее в 2.1. аналитическими зависимостями между геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами.

Структурное древо модели предоставляет собой три основных блока. Блок входные данные, промежуточного блока и блока выходных данных.

Построим модель микроГЭС бироторного типа в приложении модельно-ориентированное проектирование Simulink MATLAB [16], которые позволяет рассчитывать, обнаруживать ошибки ранней стадии разработки.

Общий вид модели представлен на рис.2.11.

В блок выходных данных, входят, являются напор H , расход Q , внутренний диаметр рабочего колеса d , внешний диаметр рабочего колеса D , ускорение свободного падения g , КПД генератора η_g , КПД турбины η_k , удельная плотность воды ρ .

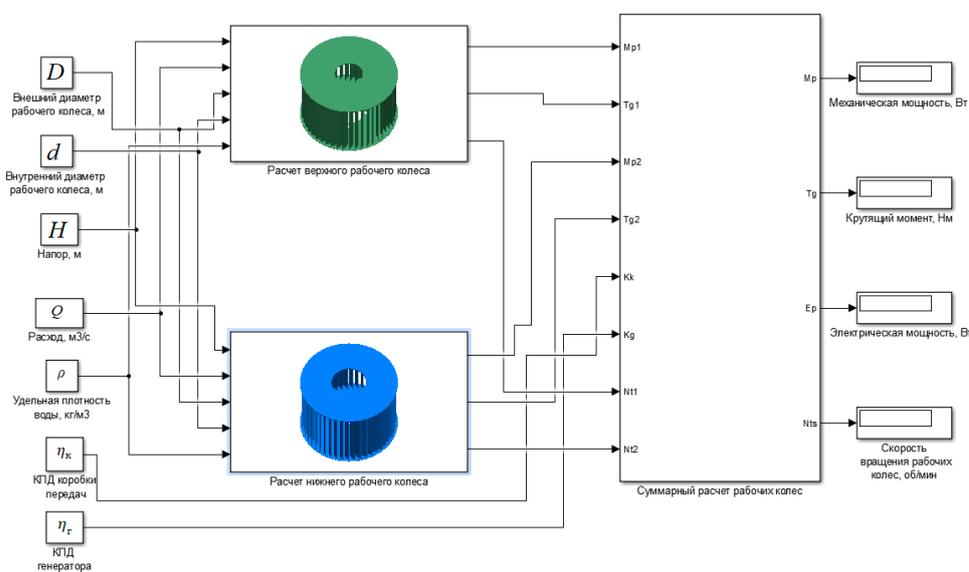


Рис.2.11. Общий вид модели расчета параметров бироторного микроГЭСа.

D - внешний диаметр рабочего колеса, d - внутренний диаметр рабочего колеса, H - напор, Q - расход, ρ - удельная плотность воды, η_k - КПД турбины, η_r - КПД генератора.

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения,

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – удельная плотность воды.

Выходные параметры промежуточного блока являются входными значениями для входного блока что: механические мощности для первой и второй турбины, крутящий моменты для обеих турбин, скорости вращения верхний и нижней колес.

Входными параметрами третьего блока являются его динамические характеристики механической мощность турбины микроГЭС, его номинальный крутящий момент, электрическая мощность генератора, и относительные суммарная скорости вращения лопастей турбины.

Структурная схема древа промежуточного блока и выходного блока с её параметрами приведена на приложениях.

2.6 Особенности изменения кинематических и динамических параметров

Построенная обобщенная математическая модель позволяет изучить особенности изменение кинематических и динамических параметров, синтезированной бироторной наплавной микроГЭС в зависимости от гидроэнергетических параметров водотоку.

Одной из наиболее отличительной особенностью, исследуемой микроГЭС, как было ранее показана, является наличие двух гидравлических турбин, осуществляющих одновременное вращение в противоположные стороны как ротора, так и статора электрогенератора, что должно обеспечивать увеличения частоты вращения электромагнитного поля генератора тем самым избегать в конструкции наличия громоздкого мультипликатора.

Однако этой особенности и изучения характера изменения частоты вращения гидротурбины от изменения напора водного потока, позволила эти характеристики которые приведены на (рис.2.12)

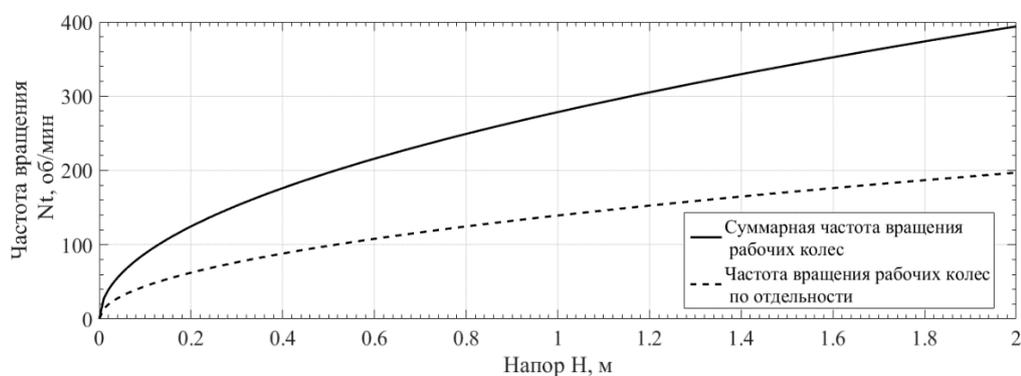


Рис.2.12. Зависимость изменения скорости рабочего колеса от напора.

Из представленных диаграмм можно видеть следующее. Характер изменения частоты вращения как ротора, так и статора в зависимости от напора полностью идентичности, что говорит о полной независимости турбин друг от друга при их работе не смотря на то их вращения осуществляется в противоположные стороны. Другими словами, воздействие единого потока на обе турбины одновременно не вызывает существенного изменения на взаимодействия сил в первой и второй лопастей турбины.

Во-вторых, может видеть, что увеличения частоты вращения лопастей как совместное, так и в отдельности имеют идентичный характер, причем явно наблюдается рост частоты вращения от увеличения величин напора, что не противоречит физике самого явления и общепринятым закономерностям, возникающих в гидротурбинах.

В рамках принятых допущений, при построении расчетной схемы турбины микроГЭС и её обобщенной математической модели предполагает теоретическим удвоения относительной частоты вращения. Как видно из представленных графиков, это предположение имеет место быть. Так, например, при напоре $H=1$ м, частота вращения турбин по отдельности достигает 150 об/мин, в суммарная относительная частота при

этом напоре составляет 300 об/мин. Следует отметить, что это возможно лишь теоретически. На самом деле конечно же обязательно будет напорная разница между частотами вращения лопастей турбин так как кроме потери на трения существенное влияние будут вносить конструктивных решения узлов скольжения валов и непосредственно масса габаритные размеры статора и ротора.

Основными динамическими параметрами микроГЭС конечно же является вращательный момент на валу турбины и его выходная мощность.

На (рис.2.13) приведена диаграмма изменения суммарного крутящего момента на валу турбины от напора.

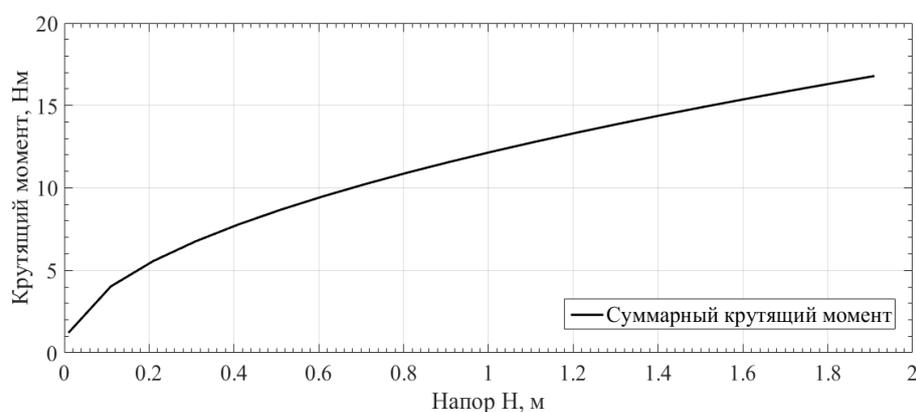


Рис.2.13. Зависимость изменения крутящего момента рабочего колеса от напора.

Как видно из графика функция изменения крутящего момента является монотонно возрастающей в зависимости от увеличения напора водного потока. Причем эта функция является явно криволинейной при небольших значениях напора, что говорит об особенности работы низконапорных турбин, выполненных в виде роторных с основной лопастью и подкрылками. Другими словами, из анализа диаграммы можно видеть, что в первоначальной период при небольших напорах интенсивность роста крутящего момента более высокая, чем в последующий период, когда она выглаживается и практически становится линейной. Следует отметить, что эта особенность присуща именно к наплавленным низконапорным микроГЭС с роторными турбинами, имеющие в наличие основную лопасть

и подкрылок, обеспечивающих противоположное вращения валов генератора при одном и том же направлении водного потока.

Изменение выходной мощности турбин МикрГЭС и её электрической мощности в зависимости от величина напора приведены (рис.2.14)

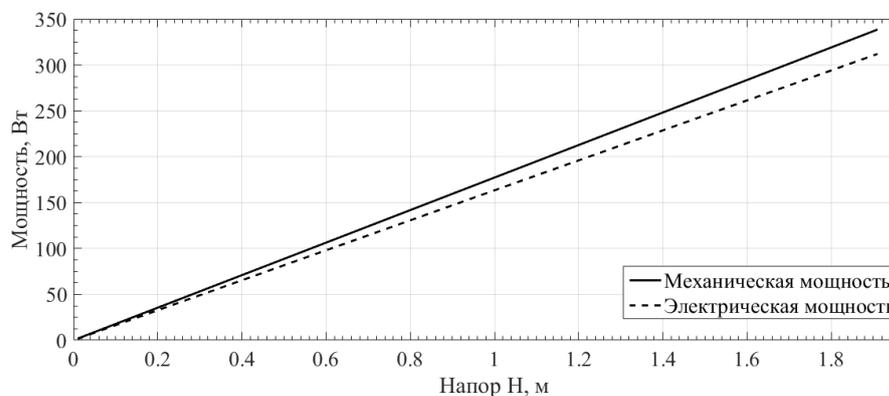


Рис.2.14. Зависимость изменения выходной мощности от

Как видно из полученных диаграмм изменения механической и электрической мощности микроГЭС несколько отличаются. Это связано с определенными потерями, возникающими непосредственно самой гидротурбине обусловленными силами трения между лопастями турбины и гидротоком, а также механическими потерями возможными в кинематических парах скольжения и качения.

Как было ранее в работе показано, что существенное значение на скорость вращения турбины позволяют не только напор подаваемого гидротока но и геометрические параметры турбины от которой в конечном итоге зависит выходная мощность микроГЭС. На основе построенной модели были получены взаимосвязи скорости вращения турбин не только от напора, но и от его внешнего диаметра.

На (рис.2.15) приведена двухмерная гистограмма взаимосвязи этих параметров друг от друга.

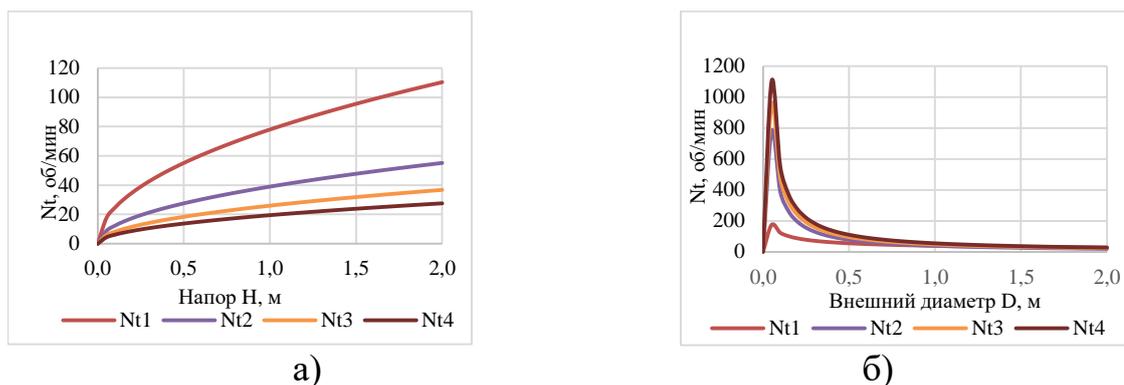


Рис.2.15. Гистограмма изменения скорости рабочего колеса (N_t).

а-при изменении напора (H), при условии, что диаметр внешнего колеса (D) остается неизменным; б-при изменении диаметра внешнего колеса (D), при условии, что напор (H) остается неизменным. Соответственно N_{t1} , N_{t2} , N_{t3} , N_{t4} -скорость вращения рабочих колес при различных серии эксперимента.

Из предоставленного можно видеть, что эти зависимости предоставляют отражающую их взаимосвязь и изменение друг от друга. Причем эти взаимосвязи явно линейные и учет этих особенностей обуславливает необходимость их учета при расчете и проектировании как профиля лопастей турбины, так и выборе требуемой мощности микроГЭС.

Для оценки достоверности полученных результатов и сопоставление их с результатами экспериментальных данных была разработана действующий конструкция наплавной микроГЭС и проверены экспериментальные исследования.

Выводы по Главе II

1. Для построения обобщенной математической модели наплавной микроГЭС разработана расчетная схема гидротурбины с двумя вращающимися в противоположные стороны турбинами с действующими на них гидродинамическими силами водного потока.
2. Разработана методика расчета и выбора геометрических и кинематических параметров гидротурбины, обеспечивающих наиболее эффективное

преобразование энергии водного потока в ее выходную мощность. Разработан алгоритм и блок-схема решения задачи определения выходных параметров микроГЭС с использованием методологии построения матрицы на основе уравнения Навье-Стокса и программного продукта Simulink Matlab.

3. Разработана обобщенная математическая модель наплавной микроГЭС, описана ее структурная схема и принцип работы.
4. В результате проведенных исследований с использованием построенной математической модели показано:
 - что при выбранных геометрических параметрах лопастей турбины частота их вращения в зависимости от напора полностью идентичны;
 - рост частоты вращения обеих турбин обеспечивает, в идеальном случае, суммарное 2-х кратное ее увеличение при одинаковом одностороннем воздействии водного потока на них;
 - крутящий момент на валу турбин, и ее выходная мощность монотонно возрастают с увеличением энергии водного потока и имеют вполне определенную закономерность, отражающую особенность работы наплавной микроГЭС с роторными турбинами, вращающимися в противоположных направлениях при одностороннем воздействии водного потока;
 - существуют вполне определенная зависимость скорости вращения турбин не только от напора водного потока, но и геометрических параметров камеры турбины. Построены пространственная трехмерная диаграмма взаимосвязи и изменения их друг от друга.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКИ

3.1 Конструктивная схема и компоновка наплавной микроГЭС.

На основе результатов анализа различных конструкций низкопотенциального микроГЭС, проведенных в первой главе было синтезирована преимущественно новая схема установки с наличием с наличием двух противоположных вращающихся турбин и на её новые технические решения был получен патент. В данном разделе работы приводятся результаты выбора и обоснования элементов конструкции синтезированной схемы микроГЭС и его общая компоновка, с целью изготовления действующего образца и проведения в дальнейшем его экспериментальных исследований. Из рассмотренных типов имеющихся наплавной микроГЭС предложение было отдано схема с вертикальной осью вращения. Она отличается простотой компоновки где генераторы микроГЭС находится непосредственно в её верхней части. Наличие возможности расположения генератора таким образом, во-первых, позволяет упростить не только сборку, но и её эксплуатацию, так как расположение никак не связана с особенностями устья реки и геометрией его водяного сечения. Другими словами, если в период эксплуатации микроГЭС будет происходить изменение стока, что потребует регулировку погружения гидротурбины в устье реки, то это никак не скажется на эксплуатационных режимах работы генератора. Во-вторых, вертикальное расположение валов гидротурбины гармонически сочетается с её приемной камерой, которая представляет собой цилиндрическую форму и технически достаточно просто, при этом укрепить вращающейся валы ротора и статора с расположенным на его концах электрогенератором.

В качестве турбины предложено использовать погружной водяной колеса один над другим с противоположными углами атаки для лопастей, чем обеспечивается их противоположное вращение при однонаправленном водном потоке реки. Исходя из анализа различных видов и типов турбин,

зависящих от предназначения выбрана турбина (колесо) роторного типа с закреплением основных лопастей на жесткой обечайке. В работах [4] адаптивной турбиной, обеспечивающей максимальную эффективность для низконапорных наплавных микроГЭС, где основной движущей энергией гидропотока является не потенциальная энергия давления столба жидкости в напорном трубопроводе, а скоростной напор обусловленной в первую очередь скоростью движения воды и его массы является роторные турбины.

Для удержания и закрепления микроГЭС в створе реки предусмотрен фиксирующий наконечник. Вся конструкция микроГЭС закреплена на раме, которая обеспечивает размещение на ней все элементов установки, а также удержание её в створе реки.

Конструктивная схема разработанной микроГЭС приведены Рис. 3.1. состоит из двух частей, которые размещены в общем корпусе 1. Корпус выполнен в виде прямоугольной рамы, с поперечными перегородками для размещения опор вращающихся узлов.

В корпусе 1 установлены две рабочих колеса 4 и 6. Каждое из колес оснащены дополнительными, фиксированными подкрылками 5 и 7. Рабочие колеса закреплены на двух валах 2 и 3. Вал 3 выполнен полым и внутри него находится вал 2.

1-корпус с поперечными перекладинами, 2 – внутренний цельный вал нижнего рабочего колеса, 3 – внешний полый вал верхнего рабочего колеса, 4,6 – рабочие колеса, 5,7 – фиксированные подкрылки, 8- радиально-упорный подшипник внешнего вала, 9 - радиально-упорный подшипник внутреннего вала, 10 – щетка генератора, 11 - ротор, 12 – статор, 13 - опорный наконечник.

Внутренний вал посажен на двух подшипниках качения 9, установленных на поперечных перекладинах корпуса. В верхней части внутреннего вала посажен ротор 11 генератора.

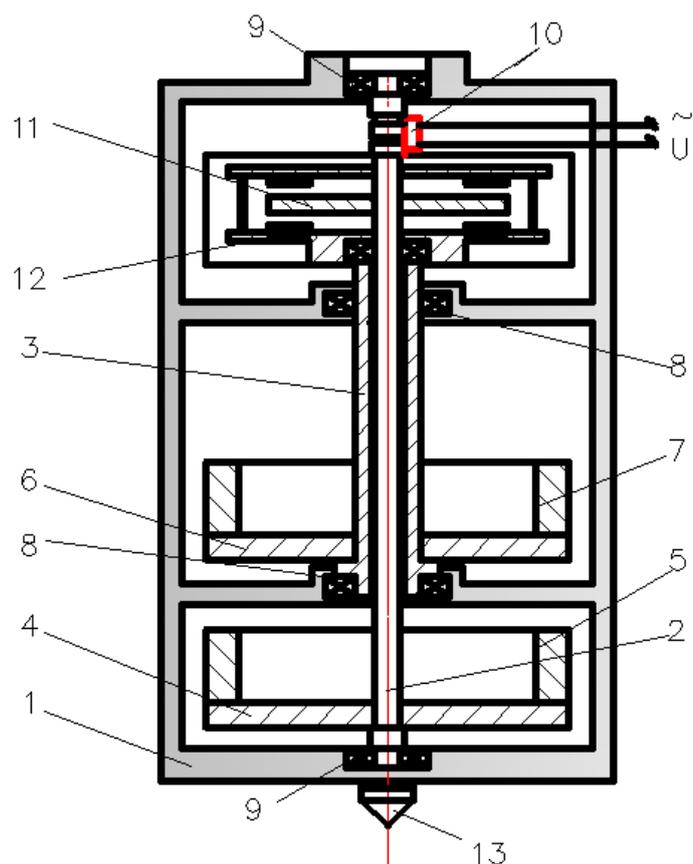


Рис. 3.1. Конструктивная схема микроГЭС.

Во внешней полый вале 3 в котором размещен внутренний вал 2 и закреплен на корпусе 1 опирается на двух подшипниках качения 8. В нижней части этого вала установлено основание 6 верхнего рабочего колеса, а в верхней части колеса установлен статор 12 генератора. Вал 11 и 12 предназначены для передачи вращательного движения к статору 12. Для фиксации гидроустановки на мелководе свободный конец нижнего вала снабжен опорным наконечником 13.

Следует отметить, что применительно к данному случаю, название деталей 11 и 12, обозначенных соответственно статор и ротор относительно, так как в рассматриваемом случае, обе эти детали вращаются. Поэтому название эти детали названы по месту их расположения, а именно, деталь, находящаяся внутри рассматривается как ротор, а снаружи – статор.

Бироторный механизм состоящий из двух вертикальных валов 2, 3 размещенных друг в друге, позволяет вращать установленные на них

рабочие колеса одновременно в противоположных направлениях. Рабочие колеса (рис. 2 и 3) жестко соединено с основания 4,6 платформами имеющих форму круга.

Крыльчатки верхнего и нижнего рабочих колес размещены таким образом, что под действием потока воды верхнее колесо, при виде с верхнего торца, вращается против часовой стрелки, а нижнее рабочее колесо - по часовой стрелке.

Принцип действия бироторной микроГЭС, как и любой другой гидроэлектростанции, основан на использовании кинетической энергии скоростного напора потока жидкости для выработки электрической энергии. При работе, установки энергия потока жидкости преобразуется во вращательное движение рабочих колес с дальнейшим преобразованием, механической энергии в электрическую.

Бироторная микро ГЭС работает следующим образом. Поток воды поступает на лопасти рабочих колес и проходя через крыльчатки водяных колес вращает их по разным направлениям. При значительном изменении напора и расхода осуществляется регулирование расхода воды путем изменения положения лопаток турбины и крыльчатки водяного колеса.

Для установки гидроустановки на мелководье свободный конец нижнего вала снабжен опорным наконечником 16. На верхней части корпуса 1, расположен поплавок 8, для установки гидроустановки на более глубокой воде.

На внутреннем 2 и наружном 3 валах гидроустановки посажены два одинаковых по конструкции рабочих колеса 4. По наружному диаметру рабочих колес установлены лопасти 5, которые входят в непосредственный контакт с потоком воды.

Лопасты подобраны таким образом, что при постоянном направлении потока воды, рабочие колеса вращаются в разные стороны. Это является одним из отличий от существующих схем преобразования энергии потока жидкости во вращательное движение приводного вала, используемых в

различных устройствах. В данном случае используется энергия потока жидкости, протекающей по обе стороны от оси вращения валов. Это создает условия для более полного использования энергии потока воды.

Принцип работы предлагаемого типа микроГЭС заключается в следующем: микроГЭС устанавливается на водоток (ручейка, река, и.т.д.) вертикально.

Под действием гидродинамического давления потока воды, действующих на лопасти рабочих колес, они приводятся во вращение и на соответствующих валах установки возникает крутящий момент. Под действием крутящего момента на соответствующих валах 2 и 3 приводится во вращение статор 12 и ротор 11. Таким образом, происходит преобразование кинетической энергии потока воды во вращательное движение валов. На основе рассмотренной схемы разработана конструкция экспериментального образца и методология расчета его основных параметров микроГЭС.

3.2 Методология выбора и расчета основных параметров микроГЭС

Методология расчета и выбора параметров основана на использовании программных продуктов Solid Works и Ansys.

Геометрические характеристики рабочего колеса были введены при помощи пакета прикладных программ для твердотельного моделирования SolidWorks. В режиме эскиза были введены очертания лопаток и подкрыльников. При помощи команды экструдирования лопатки и подкрыльники преобразованы в объемный элемент. Операция радиального повторения позволила разместить массив одинаковых по геометрическим параметрам лопаток и подкрыльников, симметричных относительно оси рабочего колеса. Несущие плоскости также были образованы путем операции экструдирования эскиза круглого очертания.

Для подготовки данных для импорта в расчетный пакет прикладных программа Ansys на основе геометрической модели рабочего колеса была образована модель жидкого тела, заполняющего пространство между структурными элементами рабочего колеса путем операции вычитания (объемный негатив) (на. рис.3.2) приведена геометрическая модель рабочего колеса роторный турбины с рабочей жидкостью между её элементами.

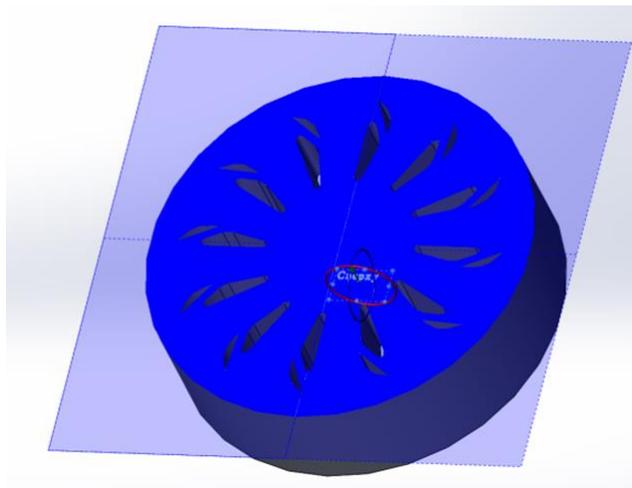


Рис.3.2. Геометрическая модель рабочей жидкости между элементами рабочего колеса.

Цилиндрический объем, в рамках которого происходит вращательное движение рабочего колеса вместе с жидкостью, задается в виде отдельного домена наряду с другим доменом условно в форме прямоугольного параллелепипеда, на гранях которого будут заданы граничные условия Дирихле и Неймана управляющего дифференциального уравнения в частных производных второго порядка на основе фиксированных значений искомых функций или их производных и выходной мощности осуществляем с использованием прикладных программ Ansys.

Методологию расчета крутящего момента на валу турбины и пакет прикладных программа Ansys обладает широким набором встроенных расчетных модулей для разных задач физического моделирования посредством преобразования уравнений математической физики в матричные уравнения. В рамках каждого отдельного конечного элемента уравнения математической физики преобразуются в матричные уравнения

как нами было ранее показано. Если объединений уравнения для каждого конечного элемента в одно большое матричное уравнение, то такой подход позволяет использовать.

На основе разработанной математической модели и методики рассчитывает основных параметров гидротурбины, а также изложенной методики моделирования процесса взаимодействия водного потока, давлений крутящего момента, выходной мощности и т.д. на примере созданного моментного образца действующей установки микроГЭС.

Исходными данными для моделирования были приняты следующие значения.

Задаваемая мощность 100 Вт, водяной напор 1 м, расход изменится в пределах 0,1 -10.2 м³/с, гидротурбина роторного типа лопасти 0,53 м², частота вращения 100 об/мин.

При этом принималось, что жидкость не сжимаема, внутреннее трения отсутствует, её температура составляет 20С, плотность 1000 кг/м³, коэффициент вязкости принять 10⁻³ Па/с, компьютерный алгоритм для выполнения поставленной задачи. В наиболее полной форме эти алгоритмы использованы нами в пакете прикладных программ Ansys. Для ограничения числа используемых расчетных модулей и задания последовательности действий и обмена данными между этими модулями в Ansys предусматривается ввод данных в виде графа и таблиц с названиями подключаемых расчетных модулей (на см.рис.3.3). Приведена схема такого подключения.

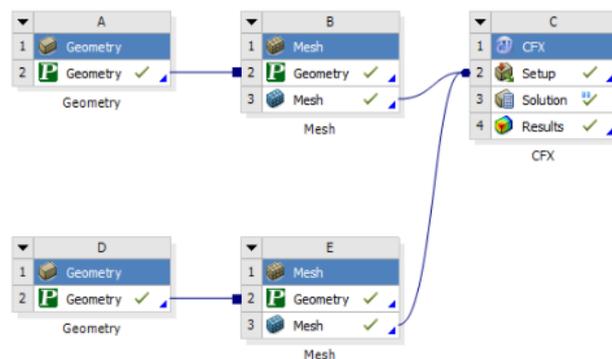


Рис.3.3. Подключение требуемых расчетных модулей.

В дальнейшем производим дискретизацию непрерывной области на конечно элементную объемную сетку, которые могут быть представлены в виде различных геометрических фигур (тетраэдра, пирамиды, призмы, треугольными и т.д. (рис.3.2). Для нашего случая дискретизацию проводится для цилиндрического домена.

На (рис.3.4) приведена дискретизация домена рабочей жидкости в пределах цилиндрического объема рабочего колеса микроГЭС.

Используя данный методологический подход и введя соответственно граничные условия для ограничивающих плоскостей вычисляем давления и угловые скорости жидкости в каждой точке домена. На (рис.3.4) приведены полученные результаты.

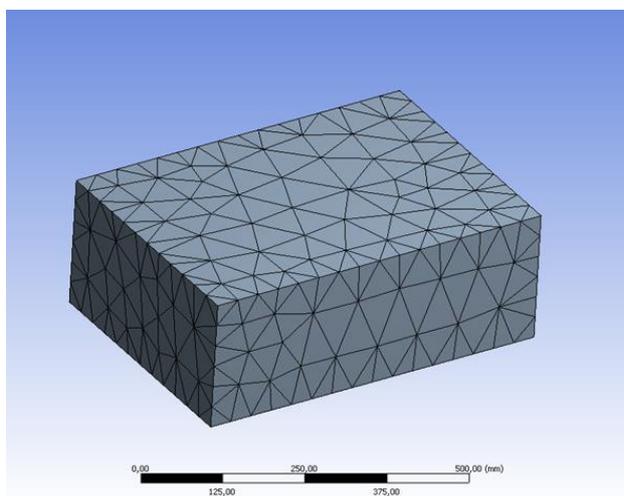


Рис.3.4. Общий вид дискретизации домена рабочей жидкости за пределами объема рабочего колеса.

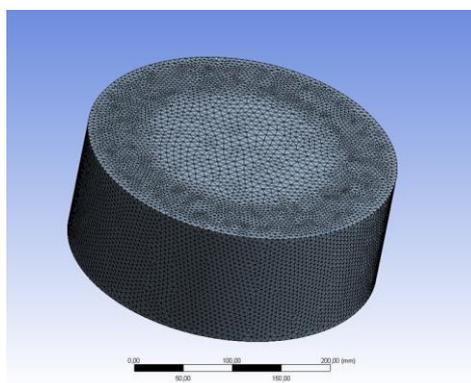


Рис 3.5. Дискретизация домена рабочей жидкости в пределах объема рабочего колеса.

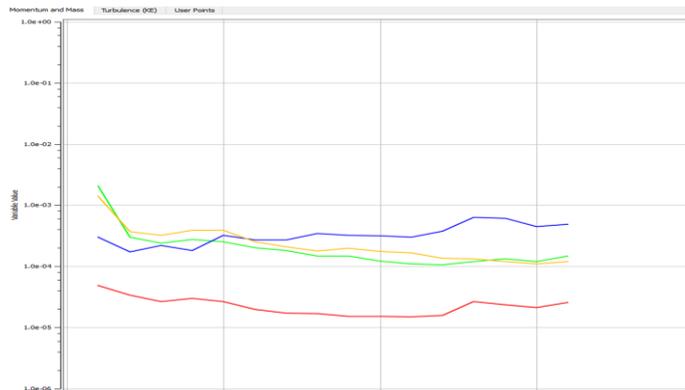


Рис.3.6 Значения крутящего момента.

Полученные данные изменения давления с угловым скоростей водного потока позволяет осуществить расчет и получить характеристики изменяющимся параметров в момента и мощности на валу турбины.

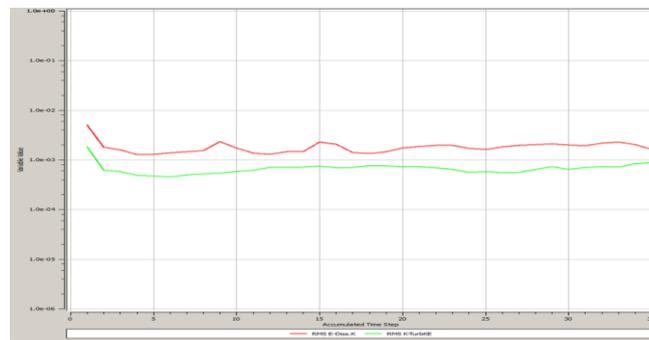


Рис.3.7. Значения турбулентности.

На (рис.3.7) представлена качественная характеристика изменения момента на валу турбины. Можно видеть, что величина переданного момента занимает ничтожного малый промежуток, а в основной своей части выходная мощность стабильна и устойчива.

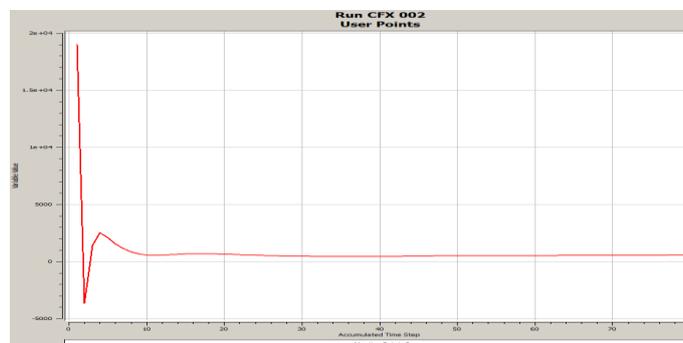


Рис.3.8. Переходные процессы и установившиеся значения мощности.

а)

б)

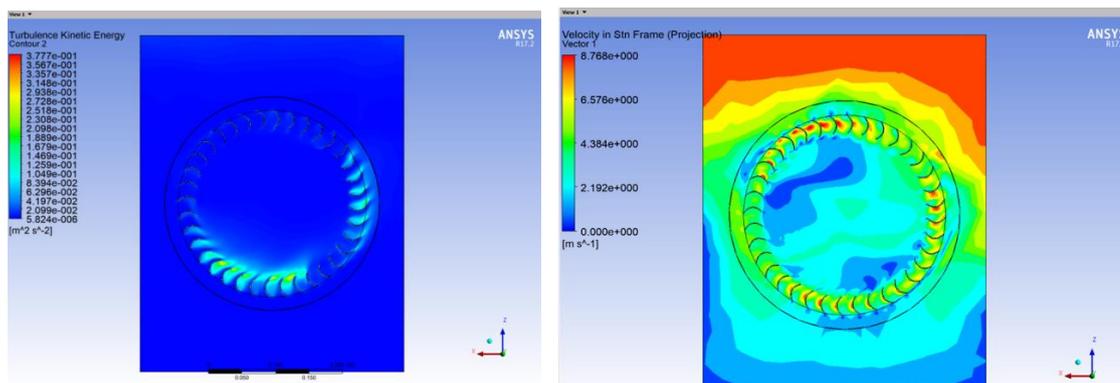


Рис.3.9. Картины распределения поля давлений и поля скоростей водного потока в турбине.

3.3 – Разработка цифрового устройства для балластной нагрузки автономной микроГЭС

Данный раздел работы посвящен разработке системы автономного управления балластной нагрузкой микроГЭС, основанной на использовании цифровой электроники с широко-импульсный модуляцией.

Развитие цифровой электроники и значительное удешевление обработки его сигналов, связанное с революцией мобильных устройств сделали доступными новые технические решения для автоматического регулирования балластной нагрузкой микроГЭС. Выполненная в 1988 г. В.В.Лукутиным [14] научно-практическая работа по автоматическому регулированию балластной нагрузки при помощи силовой электроники, на основании теории развития технических систем, позволяет перейти в следующую стадию - управление через цифровые микропроцессорные системы. При этом становится возможным сочетать современную цифровую автоматику с классическими решениями, например, ступенчатым регулированием, получив высокие характеристики управляемости по низкой цене сопоставимой со ступенчатым регулированием микроГЭС автобалластного типа с нерегулируемыми турбинами просты в конструкции, надежны и просты в эксплуатации, дешевы, но предъявляют повышенные требования к системе стабилизации выходных параметров вырабатываемого напряжения.

Существующие решения.

1. Ступенчатая релейная автоматика (пропорционально-ступенчатая балластная нагрузка). Достоинство - простота и дешевизна конструкции. Недостаток - слишком грубое управление (для четырех реле шаг 25%).

2. Аналоговая силовая полупроводниковая автоматика (аналоговая балластная нагрузка). Достоинство - тонкое автоматическое регулирование. Недостаток - требуются дорогостоящие силовые полупроводниковые устройства.

3. Цифровая автоматика с широтно-импульсной модуляцией и усилением через дорогостоящие силовые транзисторы. Это решение первым приходит при переходе от аналоговой электроники к цифровой, но при анализе можно найти более эффективные и дешевые решения, которые предлагаются в данной работе. В предлагаемом подходе предполагается использовать простоту релейной автоматики, за счет принципа цифро-аналогового преобразователя уменьшить величину шага. Мощности элементов массива балластной нагрузки принимать кратны 1х, 2х, 4х, 8х. Суммарно 15х. Где х - величина минимального шага изменения мощности балластной нагрузки. Используя двоичную логику, подключая те или иные реле, можно получить все комбинации от 0х до 15х (с шагом 1/16 от полной балластной мощности). За счет принципа цифро-аналогового преобразования 4 реле может обеспечить 16 шагов включения балластной нагрузки. Схема обладает дешевизной простой релейной автоматики и точностью, близкой к точности силовой полупроводниковой автоматики. Комбинаций включения-выключения разных реле и итоговой балластной нагрузки приведены в табл.3.1.

В результате следования такого алгоритма измерения силы тока через цифровой амперметр получается в диапазоне 0...1023.

Эта величина преобразовывается к вещественной, делится на переходной коэффициент к 4 битной системе (68), вычитается из максимального значения 15 (инвертируется), так как когда сила тока в датчике

максимальна, балластная нагрузка должна отключаться полностью (0х), а когда сила тока датчика равна нулю, балластная нагрузка включается полностью (15х).

Полученный результат округляется и преобразовывается к 8 битному без знаковому целому, которое в дальнейшем преобразовывается к битовому представлению. Старшие биты (порядка 4-7) игнорируются, так как у нас 4 битная балластная нагрузка, а к младшим битам подключается через инвертирование и реле нагрузка, пропорциональная соответственно 1х,

Комбинаций включения-выключения разных реле

Табл. 3.1

	Рел е 4	Рел е 3	Рел е 2	Рел е 1		
Модули балластной нагрузка	8х	4х	2х	1х	итог о	
Состояния реле для формирован ия комбинаций модулей балластной нагрузки	0	0	0	0	0х	Все выкл
	0	0	0	1	1х	Возрастающи е промежуточн ые значения
	0	0	1	0	2х	
	0	0	1	1	3х	
	0	1	0	0	4х	
	0	1	0	1	5х	
	0	1	1	0	6х	
	0	1	1	1	7х	
	1	0	0	0	8х	
	1	0	0	1	9х	
1	0	1	0	10х		

1	0	1	1	11х	
1	1	0	0	12х	
1	1	0	1	13х	
1	1	1	0	14х	
1	1	1	1	15х	Все вкл

Погрешность регулирования $100/16=6.25\%$, что является достаточно точным для автоматического регулирования сетей электроснабжения.

2х, 3х, 4х. Величина х подбирается исходя из конкретных значений регулируемой балластной мощности.

Для обеспечения надежности системы используем твердотельные или оптические реле, не имеющие подвижных механических частей с неограниченным коммутационным ресурсом.

Согласно необходимой мощности элемента массива балластной нагрузки можно определить требуемое электрическое сопротивление по формуле $R = \frac{U^2}{P}$. Алгоритм работы системы реализовывается при помощи доступного цифрового устройства - микроконтроллера.

Инструмент программирования - Simulink.

Simulink [3,4,5,6] **Указан недопустимый источник.** является инструментом представления алгоритма через модули математических операций (умножители, сумматоры, интеграторы, преобразователи и т.д.) с возможностью подключения цифровым и аналоговым портам вводы вывода микроконтроллеров и отладочных плат, с возможностью как проверки алгоритма через компьютер, так и генерации кода для автономной работы микроконтроллера или отладочной платы. Такой принцип работы существенно уменьшает трудоемкость разработки и проверки управляющих алгоритмов по сравнению с обычными языками программирования низкого и высокого уровня.

На рис.3.10. в верхней части приведен случайный сигнал подключения полезной нагрузки от потребителя. В нижней части - реакция системы по подключению балластной нагрузки. Четырех битовое цифровое управление балластной нагрузкой обеспечивает 16 ступеней и точность шага 6.25%. Восемьбитовое управление обеспечивает 256 ступеней и

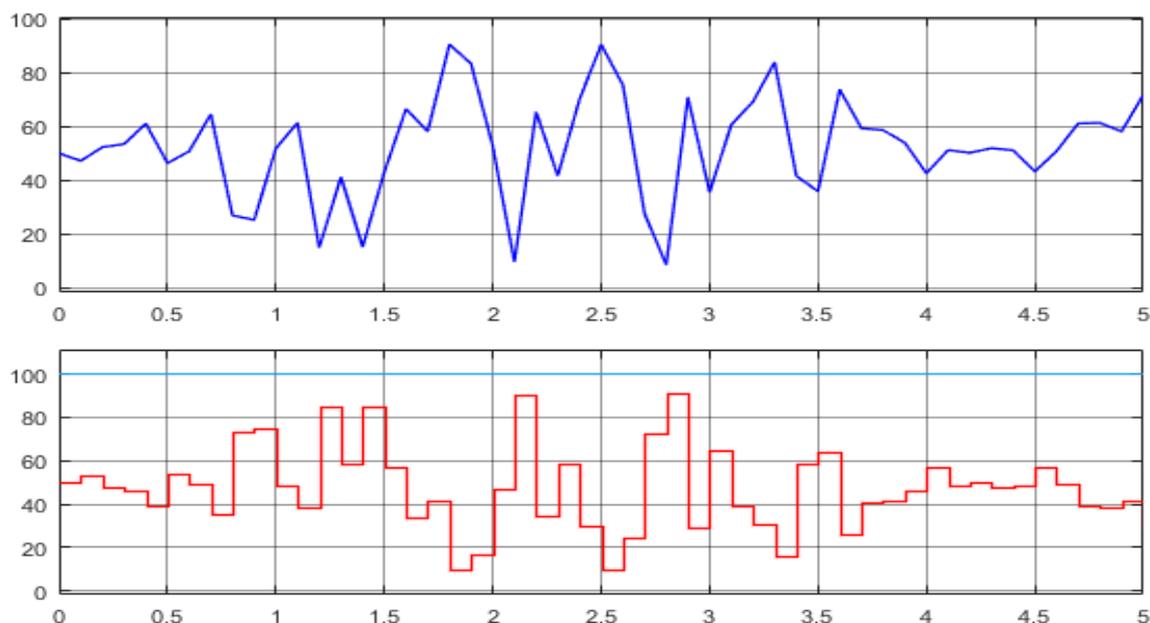


Рис.3.10. Случайный сигнал подключения полезной нагрузки от потребителя.

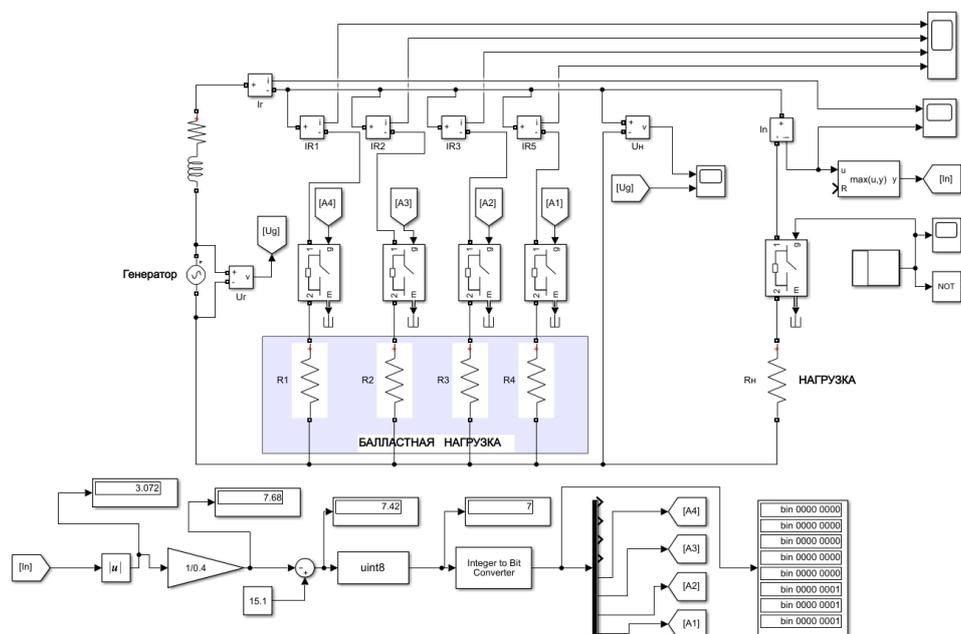


Рис. 3.11. Алгоритм цифрового управления балластной нагрузкой. точность шага 0.39%, что является избыточным. Таким образом, оптимальная разрядность цифрового управления балластной нагрузкой 4.

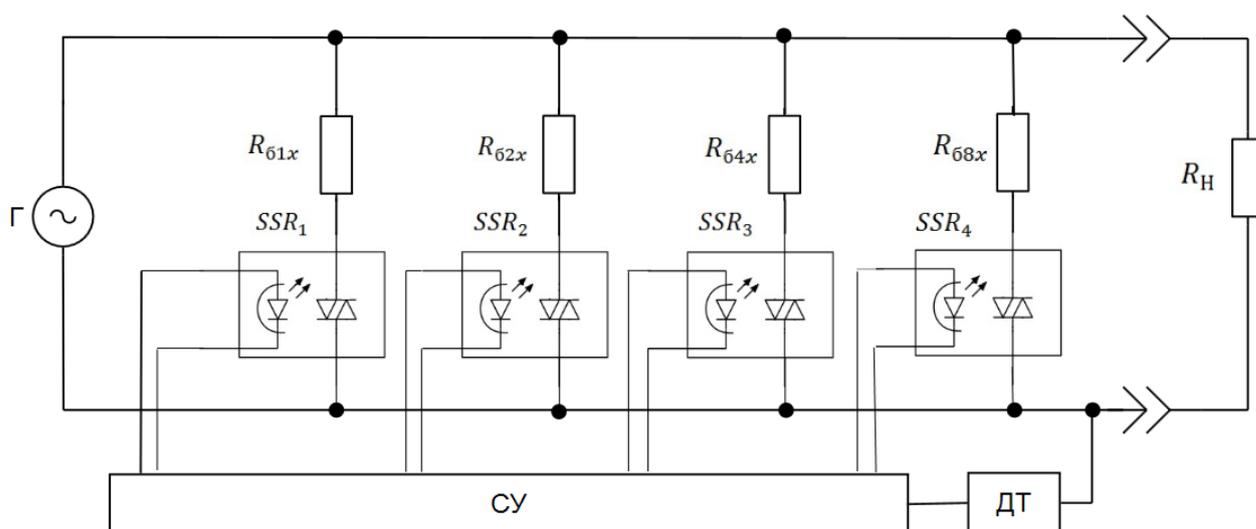
На рис.3.11. приведен алгоритм цифрового управления балластной нагрузкой, реализованный в системе Simulink на аппаратной платформе STM32F4.

Отметим, что аналогичным образом при помощи Simulink возможна реализация данного решения также на других аппаратных платформах:

- а) 32 битных специализированных процессорах с цифровой обработкой сигналов STM32 [17], NXP, [18]Texas Instruments [19] и т.д.;
- б) ARM процессорах общего назначения. применяемых в мобильных устройствах: BroadCOMM (Raspberry Pi), QualCOMM, Allwinner (Banan pi, orange Pi), Texas Instruments (Beaglebone);
- в) ПЛИС - программируемых логических интегральных схемах, например, Xilinx, Altera;
- г) операционных усилителях.

Таким образом, использование Simulink существенно облегчает переход от одной аппаратной платформы к другой.

На рис.3.12 показана структурная схема подключения массива балластной нагрузки с разным номиналам к системе управления (СУ).



. Рис.3.12. Структурная схема подключения массива балластной нагрузки с разным номиналам к системе управления (СУ).

В результате действия устройства обеспечивается регулирование, по параметрам близкое к устройством на основе силовой полупроводниковой электроники (величина шага 6.25%), но со стоимостью, близкой к стоимости простой релейной автоматики. Повышение надежности обеспечивается за счет доступных сегодня твердотельных и оптоэлектронных реле.

Дополнительное преимущество в отличие от систем на основе силовой полупроводниковой электроники - реактивная составляющая балластной нагрузки не вносит помехи в управление.

Аналогично решениям на основе силовой полупроводниковой электроники, цифровое регулирование балластной нагрузки позволяет исключить электромеханические устройства стабилизации частоты гидроагрегатов микроГЭС, а также обеспечить высокое быстродействие, что улучшит выходное напряжение источника электроснабжения. Минимизируются переходные электромагнитные процессы в якорной цепи генератора, вызванные резкими изменениями пассивной активно-индуктивной нагрузки.

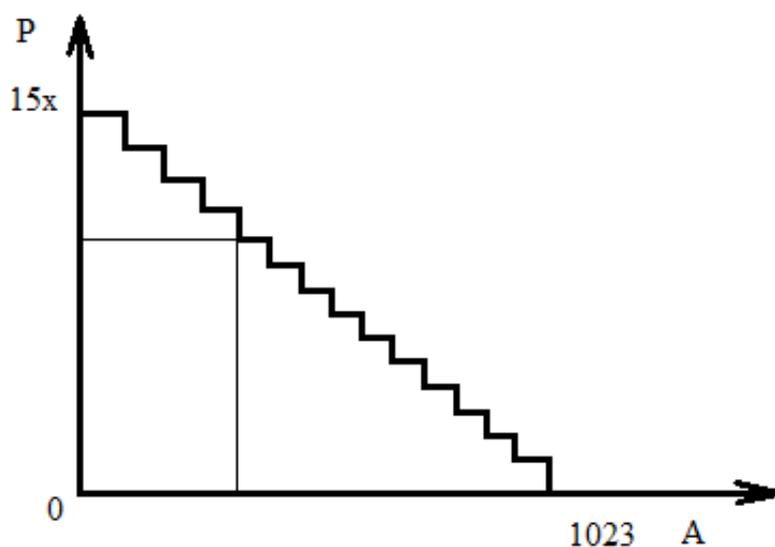


Рис. 3.13. Ватт-амперная характеристика ЦБН.
(ЦБН-Цифровая балластная нагрузка)

Также возможно на основе предложенного решения построить устройство, устраняющий несимметричную загрузку фаз.

Таблица 3.2. Пример расчета балластной нагрузки, при $P=100$ Вт, $U=12$ В.

Кратность модулей балластной нагрузки	балласт, Вт	R, Ом	Бит	нагрузка, Вт
8	53,33	2,7	1	53,33
4	26,67	5,4	1	26,67
2	13,33	10,8	1	13,33
1	6,67	21,6	1	6,67
15				100

При этом по сравнению со схемой Лукутина [14] в представленной схеме индуктивность балластной нагрузки не ухудшает работу системы, так как обратная связь построена только на показаниях цифрового амперметра, так что реактивная составляющая балластной нагрузки не оказывает колебательных воздействий на предлагаемую систему автоматического управления. Можно провести аналогию с аналоговой и цифровой телефонией, в аналоговой при увеличении расстояния суммарные помехи существенно искажают сигнал, в то время как в цифровой расстояние передачи не влияет на качество оцифрованного сигнала.

Выводы по главе III

На основе задаваемых различных геометрических параметров лопаток и подкрылков рабочего колеса определены соответствующие значения крутящего момента и мощности рабочего колеса, то есть решена задача оптимизации параметров бироторной наплавной микроГЭС для низкоскоростных водотоков. Использовано программное обеспечение для точного геометрического моделирования, дискретизации геометрических

доменов (областей с общими геометрическими характеристиками) в конечноэлементную сетку для последующего применения уравнений математической физики со сведением их в матричные уравнения, обработки результатов и получения на их основе значений крутящего момента и мощности рабочего колеса с выбором оптимальных количества, размеров, расположения лопаток и подкрылков.

Предложен и разработан алгоритм цифрового управления балластной нагрузки на основе использования современной полупроводниковой электроники, которая позволяет при 4-х битовом управлении получить точность шага 6,25%.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЭС

4.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Установление работоспособности, исследуемой микроГЭС, проверка выдвинутых гипотез и полученных расчетных, оценки достоверности разработаны методик выбора параметров, предполагает проведение комплекса экспериментальных исследований. Для их осуществления было разработаны действующая конструкция микроГЭС.

И экспериментальные исследования были проверены в лабораторных условиях, созданием искусственного потока, а также полевых условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Целью экспериментальных исследований являлись:

- установление работоспособности, созданной микроГЭС; определение основных кинематических параметров гидротурбины;
- установление взаимосвязи этих параметров с параметрами потока воды.

Экспериментальная проверка полученных расчетных значений полученной мощности микроГЭС Вращательного момента на валу турбины, ее частоту вращения, а также характер изменения частоты и напряжения на генераторе.

Для достижения поставленной цели, была создан экспериментальный стенд на основе созданной действующего образца микроГЭС. Разработана методика экспериментальных исследований с отработанной алгоритма его проведением и по замером соответствующего измерительного и регистрирующего оборудования.

Оценка работоспособности, разработанной конструкций наплавного микроГЭС был осуществлена в реальных природных условиях. На реке Кошчан, протекающей в близ с. Кожоке, Наукатского района. Эта горная речка, быстрым течением, шириной до 10-20 м. и средней глубиной 50-60 см.

Испытания и экспериментальные исследования были проведены на участке этой речки, характеризующегося относительно спокойным (ближе к ламинарному) течением.

Глубина водного потока участка речки где устанавливалась микроГЭС была определена глубиной залегания гидротурбины, а ширина участка речки, определена максимальной величиной диаметров лопастей турбины. Скорость течения водного потока определилась по времени прохождения на экспериментальной участке реки.

Для повышения точности измерений поплавков замерялся многократно с разных дистанций на расстоянии 5-10 метров.

Данные полученные в результате проведенных измерений представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Полученные данные эксперимента

№ пп	Измеряемые параметры	Номер эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	7
1.	Путь пройденный поплавком, м	15	12	10	9	8	7	8
2.	Время прохождения поплавка заданное расстояние, с	14,4	11,7	9,88	8,81	7,66	6,89	5,79
3.	Скорость течения воды, м/с	1,04	1,03	1,01	1,02	1,04	1,02	1,04

По полученным в результате экспериментальным данным была вычислено среднее значение скорости потока воды на выбранном участке,

$$V_{cp} = 1,028 \text{ м/с.}$$

Полученная скорость потока были принята исходной заданной величиной при проведенных испытаниях созданного образца микроГЭС.

Обозначив ширину и глубину выбранного участка реки соответственно, как b и h , и приняв, что водный поток подаваемый в рабочее колесо в сечении имеет форму прямоугольника, определим расход водного потока.

$$Q=b*h*V_{cp.}, \quad (4.1.)$$

Численные значения ширины и глубины водного потока на месте установки составили

$$b = 1,2 \text{ м и } h=1,4 \text{ м.}$$

При этих значениях водного потока и его значений скорости в среднем величина расхода составляла $Q=1,727 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Исходные значения водного потока были положены в основы конструкции микроГЭС. На основе разработанной математической модели, методов расчета и выбора параметров были определены все геометрические, кинематические и динамические характеристики действующего образца мощность который было определена в 100 Вт. В последующей параграфе подробно изложена конструкция и все её компоновочное решение.

4.2 Конструкция опытного образца микроГЭС.

В основу концепции и конструкции действующего образца микроГЭС были вложены три главных момента:

- возможность практической апробации работы установки и подтверждение её работоспособности в реальных природных условиях;
- чтобы действующий образец являлся основой экспериментального стенда на котором будут проведены необходимые эксперименты и массогабаритные размеры созданной микроГЭС соответствовали бы возможности проведения исследовательских работ на лабораторном стенде, где имеется возможность имитаций различных мощностей водного потока на гидротурбину.

Исходя из этого подхода была спроектирована и ___ конструкция экспериментального образца действующей микроГЭС, сборочный чертеж который приведен рис.4.1.

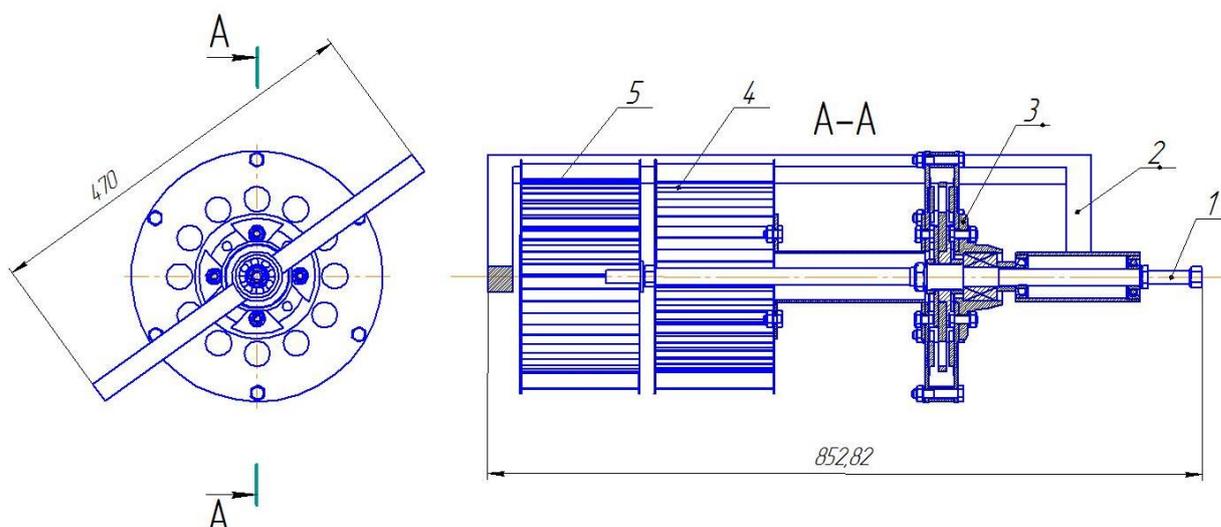


Рис 4.1. Сборочный чертеж бироторного микроГЭС
1 – Вал, 2 – Корпус, 3 – Генератор, 4 - Рабочая колесо 1, 5 – Рабочая колесо 2

Как видно из сборочного чертежа, компоновка установки основана на принципе работы синтезированной кинематической схемы установки, на которую был получен патент.

Подробно принцип работы установки был описан ранее в работе, поэтому здесь мы остановимся лишь на некоторых особенностях конструктивного решения её элементов.

Как видно из сборочного чертежа установки все элементы конструкции крепятся на его неподвижном корпусе 2, представляющей собой жесткую прямоугольную раму с возможностью установки на ней подшипников для 2-х вращающихся валов генератора 3.

На валу генератора крепятся две подкрылками для вращение самостоятельно ротора и статора генератора.

Генератор 3 выполнена на постоянных магнитах.

Поскольку ротор и статор генератора закреплены на валах турбины, вращающихся в противоположные стороны, их частота вращения магнитного

поля относительно обмоток увеличивается, что позволяет получать повышенные обороты на генераторе.

Расчет и проектирование элементов турбины генератора осуществляется на основе полученных расчетных данных математической модели, а изготовление произведена с использованием 3-D принтера. Элементы изготовленных образцов турбинных колес приведены на рис.4.2.



Рис.4.2. Представлен колес изготовлении с помощью 3-D принтера.

Как видно из рис.4.1 габаритные размеры установки наладятся в пределах

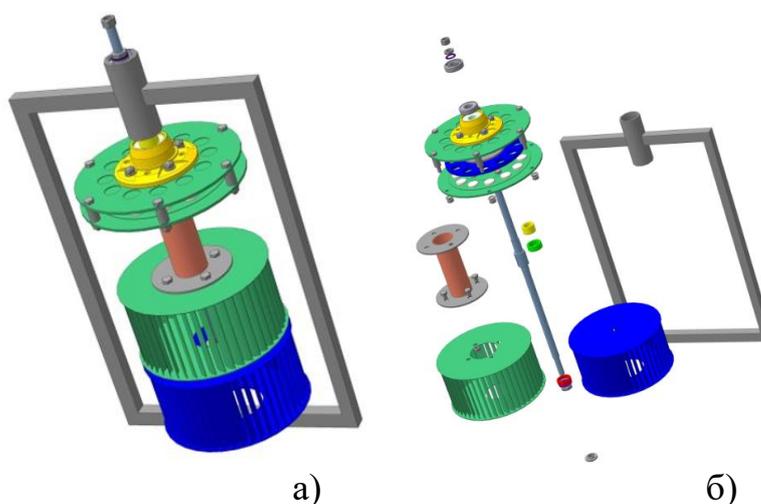


Рис.4.3. Конструкция опытного образца наплавленной микроГЭС.
а-общий компоновочный вид. б-элементы конструкции.

450x500x855мм, что позволяет в дальнейшем её использовать для проведения лабораторных испытаний на стенде.

Общий компоновочный вид конструкции микроГЭС и его основные элементы показаны на рис.4.3.

Для проведения эксперимента созданный установки была разработана методики экспериментальный исследований, которая предусматривала

проведение для различных замеров. Во-первых, испытания были проведены на в лабораторных условиях на созданном стенде. Во-вторых, в реальных природных условиях на реке.

Методики экспериментальных исследований и полученных результаты обсуждаются в следующем разделе работы

Методика экспериментальных исследований

Общий вид экспериментального стенда представлен на рис.4.4.

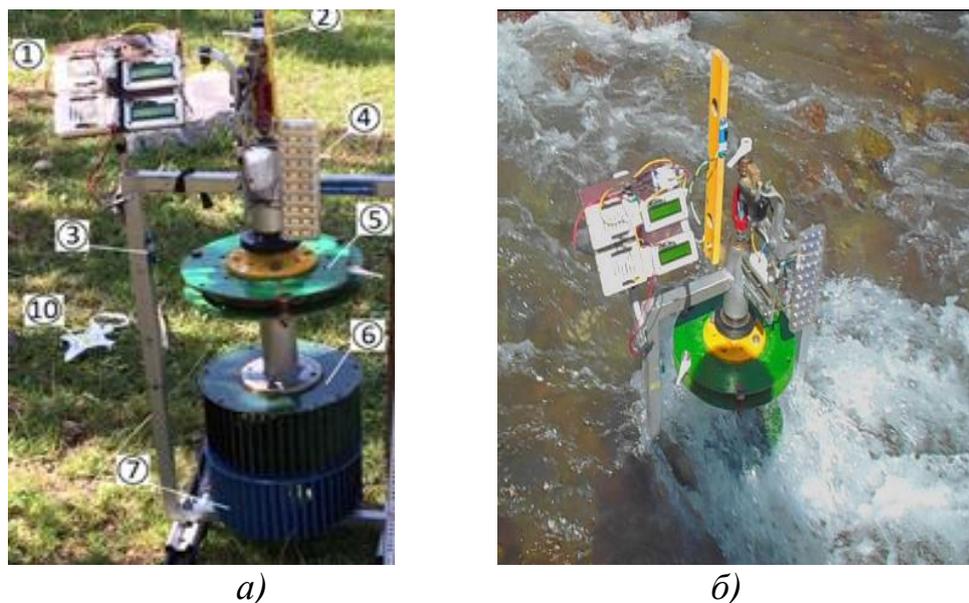


Рис. 4.4. Общий вид экспериментально-испытательного стенда.
а - экспериментальный стенд; а - проведение эксперимента

Тахометры -1 предназначены для записи частоты вращения валов гидротурбины, 2, 3 – соответственно датчики угловой скорости валов нижнего и верхнего рабочих колес, имитирует нагрузку потребителя 4, 5 – магнитный генератор обеспечивает выработку электроэнергии, 6 – верхнее рабочее колесо, 7 – нижнее рабочее колесо осуществляет вращение валов статора и ротора микроГЭС.

Как видно действующая конструкция микроГЭС оснащена измерительной и регистрирующей аппаратурой для снятия необходимыми данные с генератора, гидротурбины и замеры водных параметров водного потока.

Основными параметрами которые регистрировались приборами является частота вращения турбин генератора, скорости их влияния

электрические параметры генератора, частота, напряжения, токи. На основе которых определились мощность и выработка электроэнергии.

Угловая скорость вращения вала верхнего колеса фиксируется датчиком 3, а нижнего рабочего колеса - датчиком 2. Данные, полученные от датчиков 2 и 3 и фиксируется сдвоенным электронным тахометром 1.

Параметры электрического тока, вырабатываемого при работе микроГЭС, фиксируются комбинированным прибором, схема которого представлена на рис.4.5. Электроэнергия, вырабатываемым генератором, подается к нагружающему устройству потребителю. Питание системы осуществляется аккумуляторной батареей.

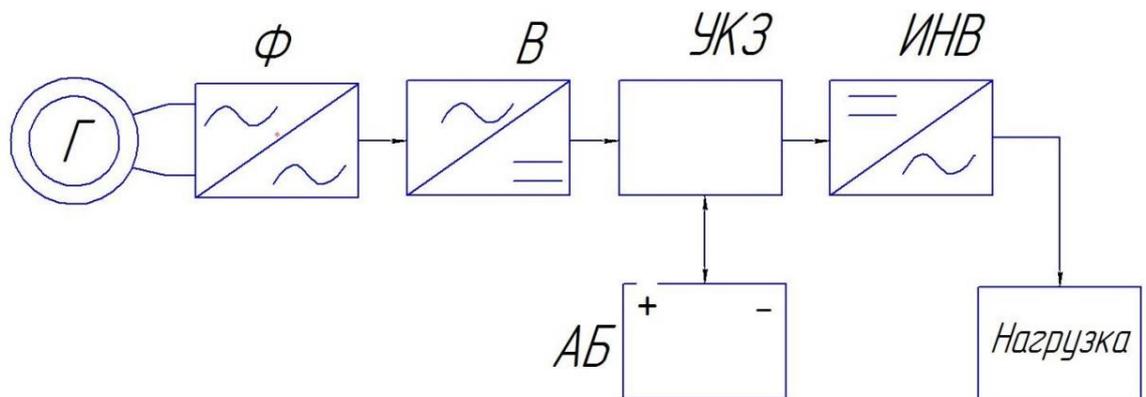


Рис. 4.5. Структурная схема подключения генератора к нагружающему устройству с применением преобразователей энергии: : Ф – фильтр, В – выпрямитель, УКЗ – управляемый контроллер заряда, ИНВ – инвертор, АБ – аккумуляторная батарея.

Устройства, предназначенные для преобразования вырабатываемого электричества выполняют различные функции. Входной сетевой фильтр (Ф) - обеспечивает подавление выбросов напряжения при переходных процессах и осуществляет фильтрацию помех.

Выпрямитель и корректор коэффициента мощности (В) - обеспечивают преобразование напряжения сети переменного тока в стабилизированное напряжение постоянного тока, обеспечивая при этом практически синусоидальную форму напряжение, потребляемого из сети, совпадающую по фазе с входным напряжением.

Инвертор (ИНВ) - преобразует напряжение постоянного тока в синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц, обеспечивая высокую надежность и точность формирования выходного напряжения.

Управляемый контроллер заряда (УКЗ) - обеспечивает контроль и управление процесса заряда аккумулятора.

Представленная схема регистрации параметров работы генератора, характеризуются следующими свойствами:

- обеспечивает необходимым стабильную частоты тока сети при различной частоте вращения ротора генератора;
- высокое качество выходного напряжения при значительных искажениях входного напряжения, при линейной и нелинейной нагрузках;
- фильтрацию высокочастотных сетевых помех и выбросов напряжения;
- высокие динамические характеристики.

Контрольно-измерительной аппаратуры, используемая для измерения параметров, характеризующих работу микроГЭС, показаны на рис.4.6.

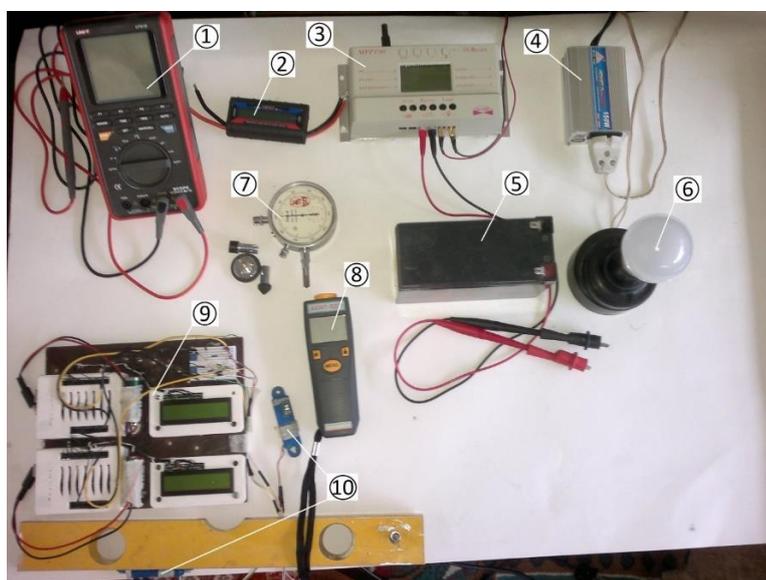


Рис.4.6. Контрольно-измерительная аппаратура для регистрации параметров работы микроГЭС:

- 1 - цифровой осциллограф-мультиметр UNI-T UT81B; 2 - высокоточный ваттметр 150А; 3 - контроллер заряда типа MPPT30; 4 – инвертер напряжения 150W B12-50; 5 – Аккумулятор GP1270 (12V 7Ah); 6 – нагрузка; 7 – тахометр ТЧ10-Р, 8 - тахометр АКИП-9201; 9 – двойной

цифровой тахометр на базе контроллера Arduino; 10 – инфракрасные датчики.

Из представленной схемы видно см. рис.4.7, что угловые скорости рабочих колес микроГЭС регистрируются цифровыми тахометрами. Полученные от тахометров данные передаются в контроллеры типа Arduino и далее выводятся на дисплеи, что позволяет провести визуальное наблюдение за процессом работы микроГЭС. В конечном счете, первичные сигналы, полученные от тахометров передаются в компьютер для дальнейшей обработки.

Первая серия экспериментов, осуществленная на лабораторном стенде представлена измерение частоты вращения отдельных валов, статора и их суммарной частоты при определенных значениях давления на лоптки турбин. Одновременно осуществлялось измерение выходного напряжения на генераторе. Для получения более высокой достоверности эксперимента измерения проводилось для каждого случая не менее чем 20 раз и определилась среднее значение измеряемой величины.

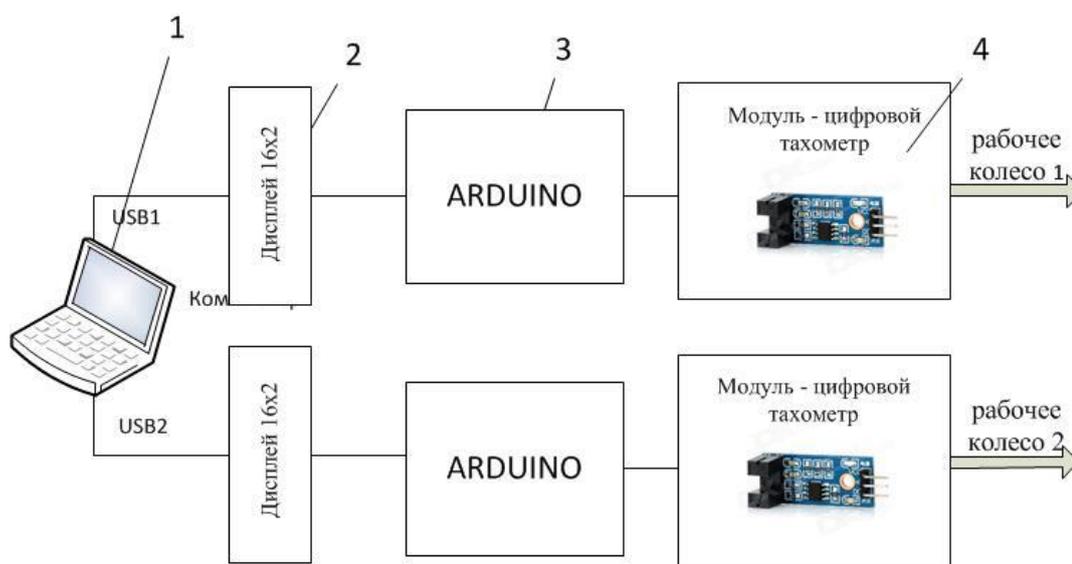


Рис.4.7. Структурная схема измерения угловой скорости валов рабочих колес микроГЭС. 1-компьютер, 2 – дисплей, 3 – модуль цифровой тахометр (инфракрасные датчики), 4-тахометр.

Вторая серия экспериментов была проведена непосредственно в реальных природных условиях с подобранными для созданной установки

приемлемыми значениями величин расхода водного потока и возможности свободного размещения водных колес турбинами по глубине ручья. При этом осуществлялись измерения угловых скоростей валов турбиной и напряжения на генераторе микроГЭС.

Как было ранее отмечено экспериментальные исследования преследовали две основные задачи. Первое это проверка работоспособности созданной новой конструкции микроГЭС. Второе это оценка достоверности полученных результатов расчета основных параметров микроГЭС на основе разработанной математической модели реальным физическим процессом.

В последующим разделе приводятся результаты экспериментов, их обработка и обсуждение.

4.3 Результаты экспериментов и их обработка.

В соответствии с методикой экспериментальными исследований, были проведен цикл экспериментов в реальных полевых условиях. В процессе экспериментов осуществлялось измерение угловых скорости валов рабочих колес и электрическое напряжение, вырабатываемое генератором. Для проведения экспериментов, образец микроГЭС установленными на нем приборами был размещён створе реки неподвижно. Каждое из двух рабочих колес находились на разной глубине. Колесо №1 находилось на глубине – 0,5 м (например), колесо №2 на глубине 0,3 м.

В первой серии экспериментов проводилось измерение скорости вращения колеса №1. При этом колесо №2 было неподвижным(зафиксировано).

Во второй серии измерений, определялось частоты вращения колес 2. При этом колесо №1 было неподвижным.

В третьей серии экспериментов осуществлялось измерения одновременно вращения обоих рабочих колес.

Для каждой серии экспериментов измерения проводилось не менее 10 раз. Средние значения параметров, измеренных в процессе экспериментов представлены в таблице 4.1.

Как видно из табл.4.1.относительная скорость вращения обоих колес, представляет собой алгебраический сумму вращения колес №1 и колеса №2.

Наблюдения в процессе проведения экспериментов показало, что работа микроГЭС обеспечивает не только повышение относительного вращения колес, но и достаточно устойчивую и надежную работу при изменении нагрузки потребителя.

Эксперименты также показали, что конструктивное решение гидротурбины в виде 2-х роторным лопастей, расположенных по вертикали один над другим обеспечивает не только надежную работу установки по их независимых работу друг от друга т.е. водяной слой воздействующим на лопасти колес практически не оказывает влияние на работу друг друга.

Таблица 4.1 – Значение параметров процессе экспериментов

№ пп	Условие экспериментов		Измеряемые параметры	
	Вращающееся колесо	Глубина расположения, м	Угловая скорость вала, об/мин	Напряжени е на выходе генератора, вольт
1.	Колесо №1	0,5	93	5
2.	Колесо №2	0,3	70	4
3.	Колесо №1 и №2	-	163*	9

Такой эффект был достигнут за счет установки между колесами неподвижных плоских ограничивающих пластин, не позволяющих смещение водяные потоки при взаимодействии с лопастями турбины. Также следует отметить что эксперимент подтвердил возможность

установки 2-х водяных колес вращения в противоположные стороны при одинаковом воздействии водного потока на них. Во время эксперимента было замечено что глубина расположения рабочих колес в водной среде вызывает определенное влияние на работу турбины. Это представляется достаточно интересным фактом, который требует проведение определенных отдельных исследований. Можно предположить, что это возможно связано с изменением скорости течения водного потока на изменения его глубины, обусловленное наличием реальных сил трения между слоями жидкости.

Экспериментальные исследования в натуральных условиях были проведены при относительно небольших скоростях течения воды, что было predetermined местом их проведения. Эксперименты для более широкого круга и изменения его параметров и более высоких скоростях течения воды, были проведены на специально созданном лабораторном стенде который был описан ранее.

При проведении исследования лабораторных условиях путем подведения к ним водного потока, давлением в 0,4МПа для каждой из них.

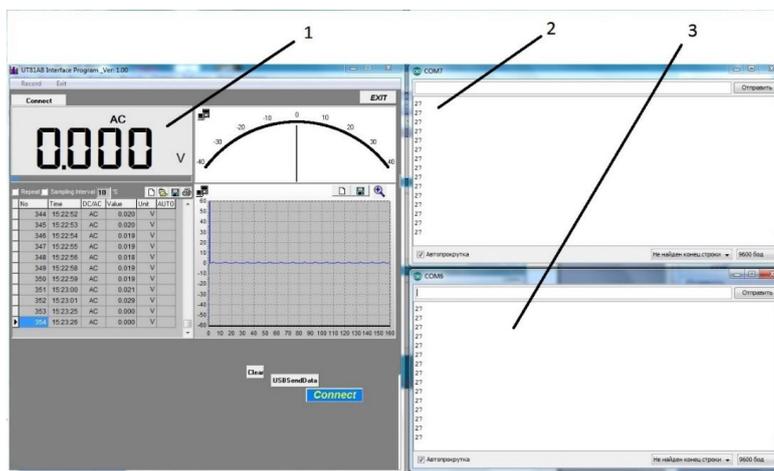


Рис.4.8. Внешний вид компьютерного электронного стенда

1 - цифровой осциллограф-мультиметра UNI-T UT81B показания напряжения и АЧХ, 2 – COM7 порт компьютера- значение датчика-1 (частота вращения верхнего рабочего колеса), 3 – COM7 порт компьютера-значение датчика-2 (частота вращения нижнего рабочего

Регистрация выходных параметров турбины и электрических параметров генератора производилось с помощью созданного компьютерного стенда см. рис.4.8, который позволяет при помощи цифрового осциллографа снимать показания напряжения на клеммах генератора и фиксировать амплитудно-частотные характеристики непосредственно на компьютер.

Одновременно с этим данный стенд позволяет фиксировать частоту по вращения рабочих колес турбины как в отдельности, так и суммарную его величину. Результаты измерения приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 -. Результаты измерения частоты вращения рабочих колес и напряжение генератора

№ эксп-та	Частота вращения валов рабочих колес, об/мин			Напряжение, Вольт
	Нижнее колесо	Верхнее колесо	Суммарная частота вращения	
1	345	343	685	30,2
2	345	345	690	30,2
3	345	345	690	29,9
4	345	346	691	29,6
5	344	346	690	29,4
6	356	102	458	15,54
7	385	129	514	15,54
8	414	156	570	15,54
9	443	183	626	15,54
10	148	159	407	15,57
11	149	136	285	15,57
12	152	136	288	15,57
13	154	136	290	15,57

14	157	136	293	15,54
15	159	137	296	15,54
16	161	137	298	15,54
17	160	137	297	15,88
18	160	137	297	15,88
19	162	137	299	15,88
20	164	137	301	15,88

Результаты экспериментальных исследований также наглядно показывают единичность их с экспериментами в натуральных условиях. Также как в первой серии экспериментов величина частот вращения как отдельных водных тоже, так и их совместная разница, обусловленная различием входных параметров гидротурбины. Полученные результаты так же подтвердили работоспособность разработанных конструкций микроГЭС и идентичность разработанной методики расчетов её параметров с использовались созданной математической модели.

Обработанные результаты экспериментов представлены в виде соответствующих диаграмм на рис.4.9.

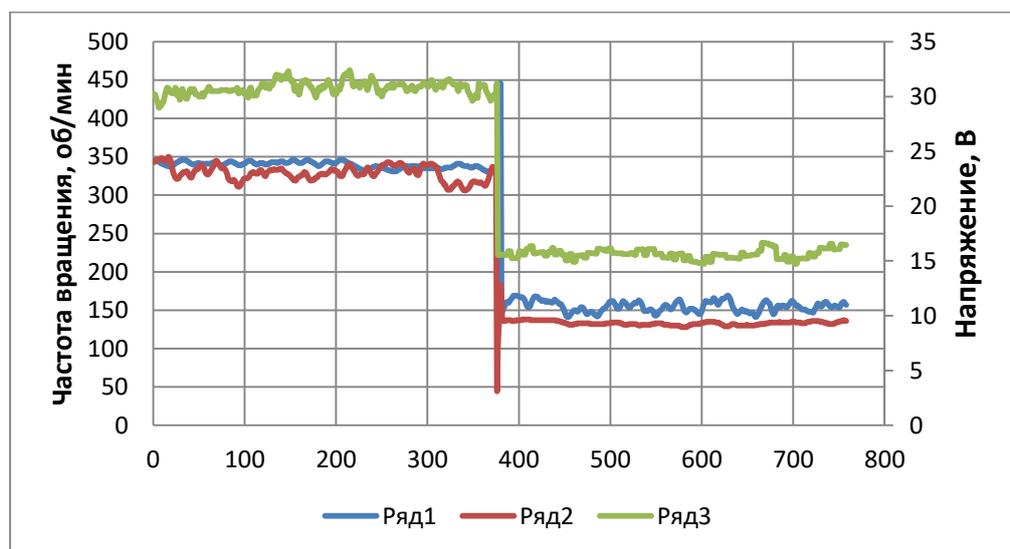


Рис.4.9. Относительная частота вращения рабочих колес.

На рис.4.9. Представлены диаграммы изменения частоты вращения лопастей гидротурбины наплавной микроГЭС. Каждой в отдельности в режиме холостого хода и режиме нагрузки.

Из представленных диаграмм можно видеть, что в режиме холостого хода, частоты вращения обеих турбин практически единичны, и работа турбины достаточно устойчиво.

При появлении нагрузки естественно происходит снижение оборотов валов турбины в результате увеличения момента сопротивления, что приводит к увеличению полезной мощности установки и выходу его на установившийся режим работы.

На рис.4.9. Также можно видеть его работа достаточно устойчиво и обороты турбин в этом режиме также идентичны.

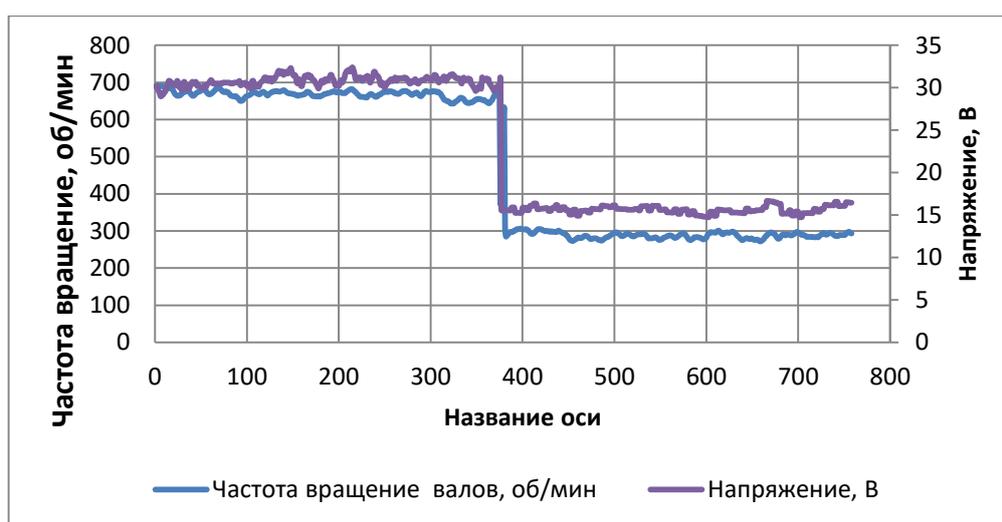


Рис.4.10. Диаграмма изменения частот вращения рабочих колес.

Рис.4.10. показан та же режимы работы микроГЭС (скоростной и при нагрузке) но с регистрацией относительной суммарной скорости вращения обеих турбин.

Как видно из полученных диаграмм величина суммарной относительной скорости вращения также представляет качественные изменения при появлении нагрузки и при переходе с режима холостого хода на рабочий режим меняет свою величину. Это говорит об устойчивости работы

турбины при нагрузке и стабильное удержание суммарной величины оборотов.

Представленная запись переходных процессов рис.4.11. показывает практически полную адекватность динамики обеих колес турбины

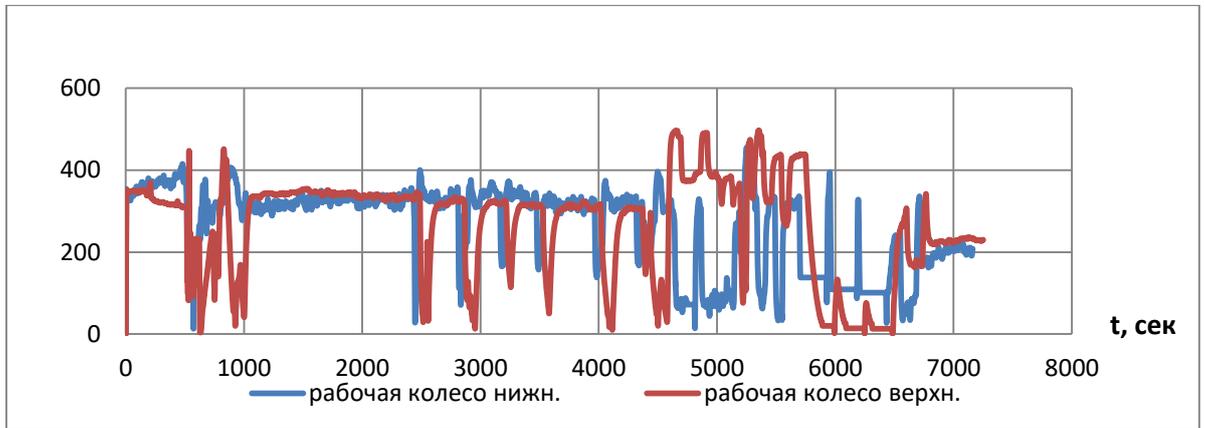


Рис.4.11. Переходные процессы

Диаграммы изменения амплитудно-частотных характеристики приведена на рис.4.12. Как видно качественная картина практически идентична как в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки. То есть

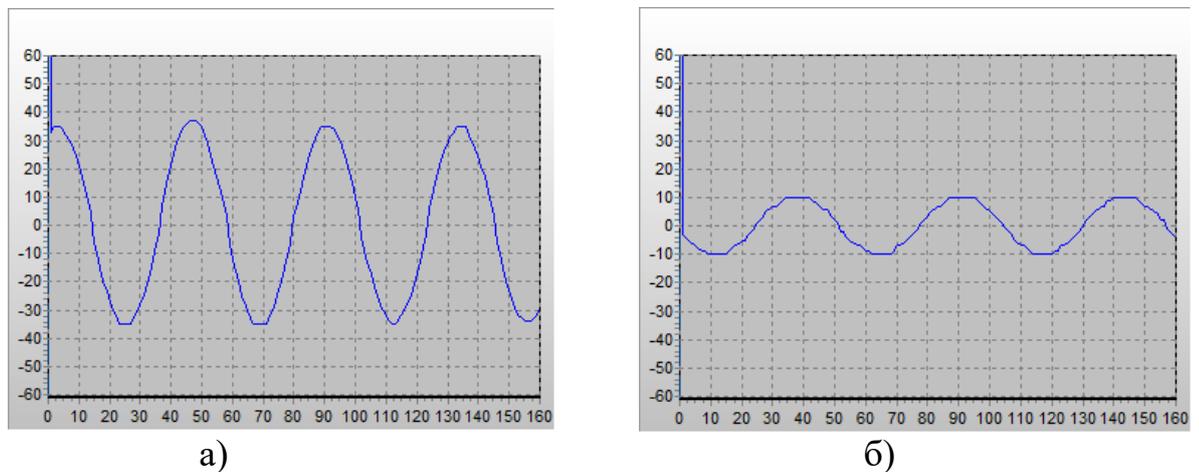


Рис.4.12. Амплитудно-частотная характеристика а- без нагрузки; б- с нагрузкой.

Параметры имеет чисто синусоидальный характер и просматривается достаточно четкий и стабильной режим работы.

Подводя итоги результатов экспериментальных исследований можно констатировать что созданная контракция микроГЭС работоспособна. Результаты теоретический расчетов кинематических параметров гидротурбин

и электрических параметров генератора соответствует ожидаемым результатам.

Работа установки происходит в устойчивом режиме. Оценка точности эксперимента с учетом класса измеряемой и регистрирующей аппаратуры не превышает 10-15%.

При проведении экспериментальных исследований были приняты следующие параметры установки.

Мощность – 100 Вт, расход 100 л/с, частота вращения 90-100 об/мин, напряжение 4-12 В, сила тока 0,3-1,5 А, частота 20-50 Гц, максимальный КПД составил 56% при напоре 0,5-1 метров и диаметре водных колес 0,28м.

Следует отметить что для разработанной конструкции наплавной микроГЭС на выработку энергии установленной мощности требует расход водного потока почти в два раза меньше по сравнению с традиционными существующими микроГЭС.

Выводы по главе IV

1. На основе проведенных исследований модели и выбранных расчетных кинематических, геометрических и гидродинамических параметров турбины микроГЭС разработана конструкция действующего образца установки.
2. Разработана методика экспериментальных исследований и создан действующий стенд на основе изготовленного образца микроГЭС.
3. Проведены комплексные экспериментальные исследования созданной конструкции микроГЭС. Изучены особенности взаимодействия рабочего колеса турбины с водным потоком.
4. Разработано цифровое устройство управления балластной нагрузкой микроГЭС при переменной нагрузке автономного потребителя.
5. Проведенный сравнительный анализ результатов теоретических исследований и результатов эксперимента позволяет сделать вывод об эффективности и надежности конструкции, разработанной наплавной микроГЭС.

б. Разработанный и созданный действующий образец микроГЭС может быть рекомендован в перспективе для промышленного освоения и широкого использования в практике, а предложенные методы расчета его геометрических, кинематических и динамических параметров могут быть приняты за основу инженерных расчетов при проектировании и изготовлении конструкции установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного состояния исследований по разработке и созданию низконапорных микроГЭС для автономного энергоснабжения маломощных потребителей.
2. На основе изучения особенностей использования микроГЭС в условиях Кыргызской Республики и анализа потенциала малых водотоков определена актуальность и перспективность исследований, направленных на разработку наплавной низко потенциальной микроГЭС.
3. Синтезирована принципиально новая схема наплавной микроГЭС, работающая на основе скоростного напора водного потока и описан принцип ее работы.
4. Получен патент на новое техническое решение наплавной микроГЭС.
5. Разработана методика расчета и выбора геометрических и кинематических параметров гидротурбины низко потенциальной наплавной микроГЭС, обеспечивающая наиболее эффективное преобразование энергии водного потока в выходную мощность.
6. Разработан алгоритм и блок-схема решения задачи определения выходных параметров микроГЭС (частота вращения турбины, момент на валу, выходная мощность и т.д.) с использованием методологии построения матриц на основе уравнения Навье-Стокса и программного продукта Simulink Matlab.
7. Разработана обобщенная математическая модель наплавной микроГЭС для расчета и выбора ее основных параметров.

8. Установлено, что для исследуемой модели микроГЭС при наличии двух турбин с противоположными углами атаки их вращения идентичны, а относительная частота вращения равна их сумме.
9. Показано, что крутящий момент на валу турбины и его выходная мощность монотонно возрастают с увеличением энергии водного потока.
10. Впервые установлена взаимосвязь геометрических параметров турбинной камеры от скорости вращения турбины и водяного напора и характер их изменения друг от друга.
11. Разработан алгоритм цифрового управления балластной нагрузки на основе использования современной полупроводниковой электроники, которая позволяет при 4-х битовом управлении получить точность шага 6,25%.
12. Разработана конструкция и изготовлен действующий образец наплавной микроГЭС, на основе которого создан экспериментальный стенд и проведены комплексные экспериментальные исследования.
13. Проведенный сравнительный анализ результатов эксперимента и теоретических исследований подтвердил эффективность и надежность разработанной конструкции наплавной микроГЭС и достоверность разработанных методов расчета основных ее параметров.
14. Результаты полученных исследований, алгоритмы и методы расчета были использованы при разработке и изготовлении действующего образца наплавной микроГЭС, работоспособность которой апробирована на одном из сельскохозяйственных объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ураимов Р.,** Медеров Т.Т. Моделирование и исследование процессов преобразования энергии в бироторной микроГЭС. [Текст]: А. Дж. Обозов, Р.А. Акпаралиев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, №32, Бишкек, 2014. - С. 273-278.
2. **Ураимов Р.,** Медеров, Т.Т., А. Дж. Обозов, Р.А.Акпаралиев. Исследование особенностей работы гидрогенератора бироторной микроГЭС. [Текст]:. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, №31, Бишкек, 2014. - С. 174-179.
3. **Ураимов Р.** и Обозов, А.Дж. Разработка низконапорной, бироторной микроГЭС. Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан.
4. **Ураимов Р.** Бироторная микрогидроэлектростанция. [Текст]:. Материалы международной научно-практической конференции на тему «Качественное образование, передовая наука, зеленая экономика – будущее планеты». Алматы, 2014. –С. 279-282.
5. **Ураимов Р.,** Обозов А.Дж. и Кенжаев И.Г. Пути повышения эффективности работы низконапорного микроГЭСа с использованиями особой формы лопатки. [Текст]:. Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан.
6. **Ураимов Р.** К задачам создания низконапорной микрогидроэлектростанции малой мощности. Ошский государственный университет. Вестник №4-2016, стр.153-158, ISSN 1694-7452.
7. **Ураимов Р.** и Акпаралиев Р.А. Экспериментальный стенд для исследования бироторной микроГЭС. Бишкек, Кыргызская Республика, КГТУ им. И.Раззакова.

8. **Ураимов Р.** и Кенжаев И.Г. микроГЭС с дифференциальным приводом. Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан.
9. **Ураимов Р.Ж.**, Кенжаев И.Г., Биймырзаева Б.А. Цифровой регулятор балластной нагрузки малой гидроэнергетической установки. Материалы конференции НПО «физика-солнце» АН РУЗ им. С. А. АЗИМОВА институт материаловедения. – Ташкент, 2018, 25-26 сентября.
10. **Ураимов Р.Ж.**, Кенжаев И.Г., Биймырзаева Б.А. Digital Ballast Load Controller for a Small Hydroelectric Plant. Applied Solar Energy. –USA, New York, 2020. – Vol.56, № 1. – P. 70-74. ISSN: 1934-9424
11. Патент на изобретения Комбинированная. **Р.Ж. Ураимов**, А. Дж. Обозов, И.Г. Кенжаев, А. Жамалов, Р.А. Акпаралиев, Т.Т.Медеров. Государственная патентная служба КР.-№1808, от 30 ноября 2015.
12. Система PowerSystemBlockset. Руководства пользователя". Перевод с англ. Гнедина П. 2001г.
13. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в МАТЛАБ 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА 2001.
14. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Озга А.И. Выбор параметров цифрового регулятора частоты автономной микрогидроэлектростанции. Гидротехническое строительство. – 1992, №9, с.40-43.
15. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений /Под общей редакцией к.т.н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
16. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник-СПб.:ПИТЕР, 2002.
17. <https://www.compel.ru/lib/ne/2011/2/4-mikrokontrolleryi-stm32-s-nulya> Микроконтроллеры STM32 «с нуля».

18. <https://www.compel.ru/lib/ne/2007/17/12-obzor-arm-mikrokontrollerov-semeystva-lpc23xx-kompanii-nxp> .
19. https://ru.mouser.com/Texas-Instruments/Semiconductors/Embedded-Processors-Controllers/Datasheets/_/N-6hpef?P=1z0zls6 .
20. Schlichting H 1960 Boundary Layer Theory. McGraw-Hill, London, New York. .
21. Taylor C and Hughes TG 1981 Finite Elements Programming of the Navier-Stokes Equation. Pineridge Press, Swansea, UK. [авт. книги] Finite Elements in Water Resources, vol. 1. Pentech Press, Plymouth, Mass., pp. 3–20. Smith IM 1976 Integration in time of diffusion and diffusion–convection equations.
22. Smith IM 1979 The diffusion–convection equation. Summary of Numerical Methods for Partial Differential Equations, Oxford University Press, Oxford, pp. 195-211. Chapter 11.
23. Muskat M 1937 The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. McGraw-Hill, London, New York.
24. Griffiths DV 1994b Stiffness matrix of the 4-node quadrilate element in closed-form. Int J Numer Methods Eng 37(6), 1027–1038.
25. Griffiths DV 2004 Use of computer algebra systems in finite element software development. Proceedings of the 7 th International Congress on Numerical Methods in Engineering and Scientific Applications, CIMENICS '04 (ed. Rojo J et al.) Sociedad Venezolana de.
26. Taig IC 1961 Structural analysis by the matrix displacement method. Technical Report SO17, English Electric Aviation Report, Preston.
27. Ergatoudis J, Irons BM and Zienkiewicz OC 1968 Curved iso parametric quadrilateral elements for finite element analysis. Int J Solids Struct 4, 31.
28. Zienkiewicz OC, Irons BM, Ergatoudis J, Ahmad S and Scott FC 1969 Iso parametric and associated element families for two and three dimensional analysis. In Proceedings of a Course on Finite Element Methods in Stress Analysis (eds. Holland I and Bell K). No.

29. Ergatoudis J, Irons BM and Zienkiewicz OC 1968 Curved isoparametric quadrilateral elements for finite element analysis. *Int J Solids Struct* 4, 31.
30. Irons BM 1966a Numerical integration applied to finite element methods. Conference on the Use of Digital Computers in Structural Engineering, University of New Castle, New Castle, Pa.
31. Irons BM 1966b Engineering applications of numerical integration in stiffness method. *JAmInst AeronautAstronaut* 14, 2035.
32. Kopal A 1961 *Numerical Analysis*, 2nd edn. Chapman&Hall, London, New York.
33. Zienkiewicz OC, Too J and Taylor RL 1971 Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *IntJ NumerMethodsEng* 3, 275–290.
34. Cardoso JP 1994 *Generation of Finite Element Matrices Using Computer Algebra*. Mastersthesi, School of Engineering, University of Manchester.
35. Zienkiewicz OC, Too J and Taylor RL 1971 Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *IntJ Numer Methods Eng* 3, 275–290.
36. Bathe KJ 1996 *Numerical Method sin Finite Element Analysis*, 3rd edn. PrenticeHall, EnglewoodCliffs, N.J.
37. CENTRAL ASIA HUMAN DEVELOPMENT REPORT. Bringing down barriers: Regional cooperation for human development and human security.
38. Экономическая эффективность тепло энергии в строительстве. Центрально азиатская горная программа (СAMP) "Объединение усилий для поддержки устойчивого развития горных регионов", Мониторинг 2002.
39. Руди Кунц. Дом из соломенных тюков в Жарды Суу, Кыргызстан. Заключительный отчет ОсОО Экофакта, Центральноазиатская горная программа (СAMP) "Объединение усилий для поддержки устойчивого развития горных регионов", Кыргызстан, 2004.

40. Отчет о проведение тематического ALS семинара по "Энергосбережению" в селе 1- Мая. Центрально азиатская горная программа (САРМ) "Объединение усилий для поддержки устойчивого развития горных регионов".
41. Отчет о проведение теплоизоляции 2-х домов в селе 1 Мая, Кара-Кульджинский район Ошская область, Кыргызстан. Центрально азиатская горная программа (САРМ) "Объединение усилий для поддержки устойчивого развития горных регионов".
42. Описание типичных печек в горных селах Кыргызской Республики. Центрально азиатская горная программа(САРМ)"Объединение.
43. Доклад о развитии человека 2007/2008. Борьба с изменениями климата: человеческая солидарность в разделённом мире / Пер. с англ. - М.: Издательство «Весь Мир», 2007. - 400 с.
44. Карелин В.Я, Влошаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. –М.: Энергоатомиздат, 1986 г. с. 256.
45. Центрально-азиатское региональное экономическое сотрудничество: Комплексный план действий. Пятая Министерская конференция, 18-20 октября 2006 г., Урумчи, СУАР, Китайская Народная Республика.
46. Solarhome. Гидроэлектростанции. Ассортимент оборудования. - электронный ресурс. URL: <http://www.solarhome.ru/ru/hydro/inset.htm> (дата обращения 18.08.2017).
47. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Курс лекций.
48. Ильиных И.И. Гидроэлектростанции. М.: «Энергоиздат», 1982. .
49. Беляков Ю.П., Рахимов К.Р. Изучение и использование гидроэнергетических ресурсов Кыргызстана. Бишкек: Кыргызский Технический Университет, 1995.
50. Кривченко Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы. М.: Энергия, 1978.

51. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – Учеб. для вузов. – Изд.е. М.: Наука, 1987. .
52. Андреевская А.В, Кременецкий Н.Н, Панова М.В. Задачник по гидравлике. Изд. 2-ое. М., «Энергия» 1970. .
53. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов/А.Дж. Обозов, Р.М. Ботпаев. – Бишкек, ИЦ «Техник», 2010 г. – 264 стр.
54. Ильиных И.И. Гидроэлектростанции: Учебник для техникумов. — М.: Энергоиздат, 1982.
55. Нетрадиционные источники энергии: учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений специальности 43 01 03 «Электроснабжение» в 2 частях / М.М. Олешкевич. – Мн.: БНТУ. – 2007. ч.1 – 53 с.
56. Барков, К.В. Анализ и методика оценки параметров малых ГЭС: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.14.08 / Барков Константин Владимирович. – СПб., 2005. – 172 с. .
57. Голицин, М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицин, Н.В. Пронина; отв. ред. Г.С. Голицин. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
58. Гулия, Н.В. Накопители энергии / Н.В. Гулия. – М.: Наука, 1980. - 151 с.
59. Бут, Д.А. Накопители энергии: учебное пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. –М.: Энергоатомиздат, 1991.– 400с.
60. Денисов, И. П. Основы использования водной энергии. / И. П. Денисов - М.: Энергия, 1974. – 135 с.
61. Асарин, А.Е. Водно-энергетические расчеты / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 222 с.
62. Блинов, Б. С. Гирляндная ГЭС / Б. С. Блинов – М-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 63 с.

63. Кривченко, Г. И. Гидравлические машины: Турбины и насосы. Учебник для вузов. / Г. И. Кривченко – М.: Энергия, 1978. – 320с.
64. Alejandro Reyes, Beginner's Guide to SolidWorks 2015.- 269 p. 21. ГОСТ 23956-80 Турбины гидравлические. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005. – 13 с.
65. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии .Учебное пособие 2008.-186с.
66. Телегин В.В. Повышение эффективности функционирования систем. Автореферат. 2014-20с.
67. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS /В. Кельтон, А. Лоу. 3-е изд. – СПб.: Киев:, Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
68. Соснина, Е.Н. Методика выбора оптимального сочетания возобновляемых источников энергии для локальных энергосистем / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо // Труды Нижегородского гос. техно университета им. Р.Е. Алексеева, 2012. – № 3(96).-С 215-220.
69. Андрижиевский, А.А. Энергоснабжение и энергетический менеджмент / А.А. Андрижиевский, В.И. Володин. – Минск: Высш. шк., 2005. – 294.
70. Лямасов А.К. Исследование работы гидромашин малой ГЭС: центробежного насоса в обращенном режиме и гидродинамической передачи // Вестник УГАТУ. Т.17. №3 (56), 2013. С. 189-193.
71. Фортов В.Е., Макаров А.А. Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России // Вестник Российской Академии наук. 2004. Т. 74, №30. С. 195-208.
72. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
73. Родионов Л.В., Крючков А.Н., Гафуров С.А. Численное моделирование структуры потока жидкости в проточной части

- шнекоцентробежного насоса газотурбинного двигателя.
Электронное учебное пособие 2011/ 113 с. .
74. Хахалева Л.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Ульяновск, 2007.
75. Развитие возобновляемой энергетики в Европейском Союзе. 2016 - <https://www.hse.ru/>.
76. Попов В.П., Михасек А.А., Селиверстов В.А. Влияние геометрических характеристик входного участка водопропускного устройства гидротехнического сооружения на гидравлические параметры потока .
77. Топаж Г.И. Лопастные гидромашины и гидродинамические передачи. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического университета. 2011. 153 с.
78. Стесин С.П, Яковенко Е.А. Гидродинамические передачи. М.: Машиностроение, 1973. 352 с. <http://www.twirpx.com/file/1880554/>.
79. Свит П.П. Разработка микро-гэс с асинхронными генераторами для сельскохозяйственных потребителей. Автореферат. Барнаул 2017.
80. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. -М.:Энергоатомиздат. 1986. - 199 с. <http://www.twirpx.com/file/270111/>.
81. Davis S. Microhydro: Clean Power from Water Publisher: New Society Publishers. 2003. - 176 pages. <http://www.twirpx.com/file/1029056/>.
82. Виссарионов В.И. и др. Водно-энергетические и водохозяйственные расчёты. <http://www.twirpx.com/file/96768/>.
83. Апполов Б.А. Учения о реках. <http://www.twirpx.com/file/760967/>.
84. Громов В.И., Флексер Я.Н. Использование водной энергии. <http://www.twirpx.com/file/2078421/>.
85. Милович А.Я. Нерабочий изгиб жидкости. <http://www.twirpx.com/file/576815/>.

86. Милович А.Я. Вихревая теория направляющего аппарата и камеры турбины. <http://www.twirpx.com/file/576795/>.
87. Bostan I., Gheorghe A. Resilient Energy Systems: Renewables: Wind, Solar, Hydro. <http://www.twirpx.com/file/1050834/>.
88. Tiemersma J.J., Heeren N.A. Small Scale Hydropower Technologies. <http://www.twirpx.com/file/141539/>.
89. Tiwari G.N., Mishra R.K. Advanced Renewable Energy Sources. <http://www.twirpx.com/file/1665977/>.
90. Al-Shemmeri T. Engineering Fluid Mechanics. <http://www.twirpx.com/file/858476/>.
91. Obradovic D. Hydropower water hammer analysi. <http://www.twirpx.com/file/85661/>.
92. Февралев А.В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках. <http://www.twirpx.com/file/2308861/>.
93. Щавелев Д.С. Использование водной энергии, 1965.
94. Davis S, Microhydro. Clean power from water.
95. Лукутин В.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом. //Промышленная энергетика. – 2000, №8, с.49-52.
96. Соколов Д.А. Использование водной энергии. - М.: Машгиз, 1960. — 343 с. <http://www.twirpx.com/file/73559/>.
97. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 14.0. November 2011. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. Release 14.0. November 2011.
98. Проф. В.Н. Пинегин. Турбина банки и ее теоретический коэффициент полезного действие.
99. Смирнов, И. Н., Гидравлические турбины и насосы. [Текст]: учеб. пособие для энерг. и политехнич. вузов / И. Н. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1969. – 400 с. .

100. Ковалев, Н. Н. Гидротурбины: конструкции и вопросы проектирования [Текст] / Н.Н. Ковалев. – Л. : Машиностроение, 1971. – 584 с. .
101. Кривченко, Г. И. Гидравлические машины: Турбины и насосы [Текст]: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. / Г. И. Кривченко. – М. : Энерго-атомиздат, 1983. – 320 с.
102. Акпаралиев Р.А. Диссертационная работа «ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА БИРОТОРНОГО ГИДРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МИКРОГЭС»
103. Медеров Т.Т. Диссертационная работа «ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА БИРОТОРНОЙ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ»
104. Медеров, Т.Т. Анализ состояния развития гидропреобразователей малой мощности [Текст] / Т.Т. Медеров, А. Дж. Обозов // «Наука – основа инновации»: материалы 54-й научно-техн. конф. молодых ученых и студ. – Б.: ИЦ Текник, 2012. – С. 95-100.
105. Институт КирНИОЭ.
106. Обозов А.Д. ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В КЫРГЫЗСТАНЕ Теплоэнергетика. 1991. № 12. С. 49-52.
107. World Economic Outlook. WEO, 2008 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.iea.org/weo/>.- Дата доступа: 24.03.2019
108. Журнал Международная Жизнь [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://interaffairs.ru/news/printable/9854>. - Дата доступа: 24.03.2019
109. Электронный ресурс <https://profilbaru.com/ru>

110. Электронный ресурс <https://www.gidroburo.ru/index.php/a-proektirovanie/a-4-malye-ges/38-a-4-01-chto-takoe-malaya-ges-klassifikatsiya-po-moshchnosti>.
111. В.Е. Михайлова, И.П. Иванченко, А.Н. Прокопенко, ОАО “Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова”, Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2021, № 2, с. 5–15.
112. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – М. : ЭНАС, 2010. – 352 с. : ил. ISBN 978-5-4248-0002-3
113. Электронный ресурс <http://www.eabr.org/rus/publications/AnalyticalReports/>
114. World Economic Outlook. WEO, 2020 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.iea.org/weo/>.
115. Ашимбекова Б.А., Обозов А.Д. .Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2022. № 1 (61). С. 24-30.
116. Электронный ресурс <https://www.irena.org/>
117. Кулганатов, А.З. Внедрение комбинированных установок на базе ВИЭ в процессы нефтедобычи и геологоразведочных работ / А.З. Кулганатов, А.А. Мирошниченко, Е.М. Гордиевский, Е.М., В.И. Станчаускас, А.А. Берестинов,
118. Национальная водная стратегия Кыргызской Республики до 2040 года. от 10 февраля 2023 года № 23
119. Электронный ресурс: https://www.ibt.kg/ru/download/593/cdb_2014-ru.PDF.
120. Постановление. Об утверждении Концепции развития малой гидроэнергетики Кыргызской Республики до 2017 года. от 20 июля 2015 года № 507.

121. Современное состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики в странах СНГ. – Алматы, 2011. – с. 36 ISBN 978–601–7151–24–9.
122. Цыба Ю.А., Кузьмин Ю.В., Современное состояние электроэнергетики. Сессия: ЭКСПО-2017 площадка интеграции глобальных инициатив проектирования будущего.
123. Дыйканов Э., ВИЭ энергоэффективность в Кыргызской Республике. Астана 07.10.2013.
124. Статистика энергетики в Кыргызской Республике, Бангкок (Тайланд), 7-8 Октября 2019 год. <http://www.stat.kg>.
125. Проект национальный план действий по устойчивой энергетике Кыргызской Республики, https://unesc.org/fileadmin/DAM/project-monitoring/unda/16_17X/E2_A2.3/NSEAP_Kyrgyzstan_RUS.pdf
126. Друзь Н., Борисова Н., Асанкулова А., Раджабов И., Захидов Р. Таджиев У., Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии. ОБЗОР, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188236>.
127. Малая энергетика с большими проблемами. [Электронный ресурс] -18.01. 2015 г, <http://www.biom.kg/informatory/press/58219f4ca6016dcc8ae5888d>.
128. Аккозиев И.А., Богомбаев Э.С., Виноградов Д.В., Сейдакматова Д.В. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в Кыргызской Республике:/учебно-справоч. пособие. Бишкек: КРСУ, 2012.230 с.ISBN 978-9967-05-865-1, <http://lib.krsu.edu.kg/uploads/files/public/4443.pdf>.
129. Токомбаев К.А. Новые принципы использования возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве (на примере Киргизской ССР). – Фрунзе: Илим, 1990. – 280 с.
130. Башмур К.А. Конференция: Потенциал при использовании гидрокинетических турбин винтового типа. природноресурсный

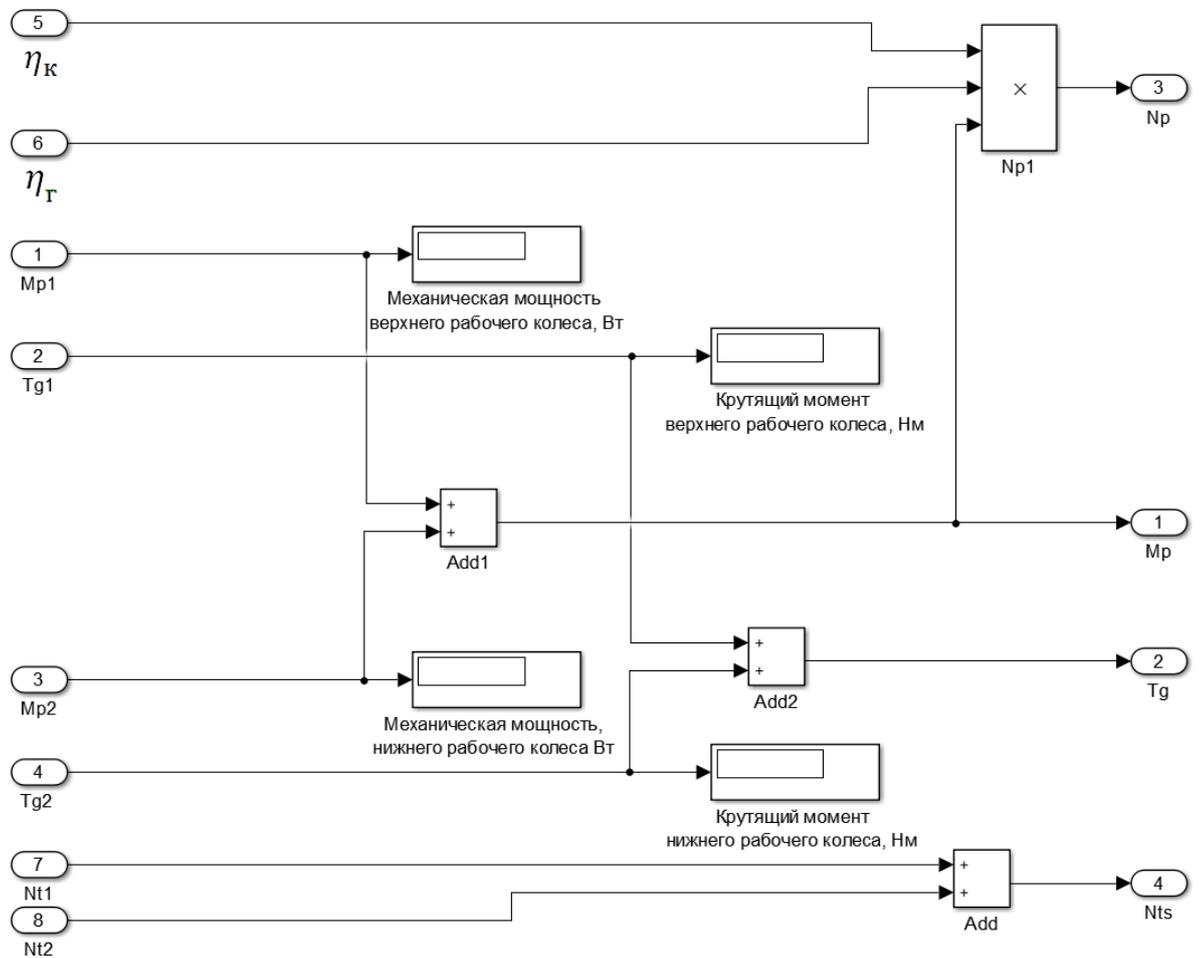
потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России Пенза,
23–24 января 2023 года.

131. Франц Зоттерер З. Гравционно-вихревая электростанция. ZOTLÖTERER SMART-Energy-Systems: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.zotloeterer.com/> (дата обращения: 21.01.2012).
132. Проскура, Г.Ф. Гидродинамика турбомашин [Текст] / Г.Ф. Проскура. - К.: Машгиз, 1954. – 416 с

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Решение задачи математической модели бироторного МикрГЭСа.

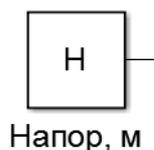
Помощью программного продукта Matlab-Simulink.



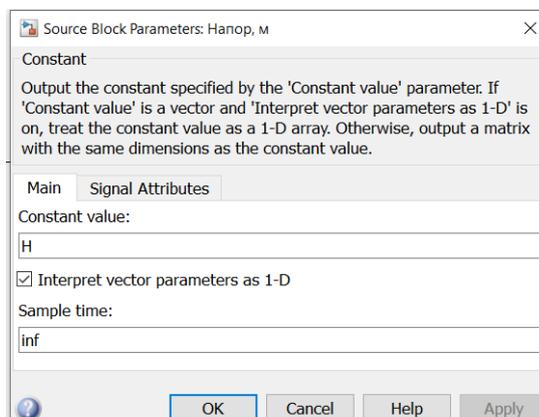
Структурная схема древа блока с сумарными выходным параметрами.

M_{p1} – механическая мощность верхнего рабочего колеса, T_{g1} – крутящий момент верхнего рабочего колеса, M_{p2} – механическая мощность нижнего рабочего колеса, T_{g2} – крутящий момент нижнего рабочего колеса, N_{t1} – скорость вращения верхнего рабочего колеса, N_{t2} – скорость вращения нижнего рабочего колеса, η_k – КПД турбины, η_r – КПД генератора, M_p – суммарная механическая мощность рабочих колес, T_g – суммарный крутящий момент рабочих колес, N_{ts} – суммарная скорость вращения рабочих колес, N_p – электрическая мощность.

Ниже приведены и представлены описание основных операционных блоков построенной математической модели с использованием программного продукта SimuLink MatLab.



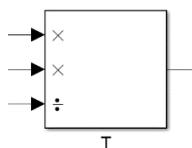
а.



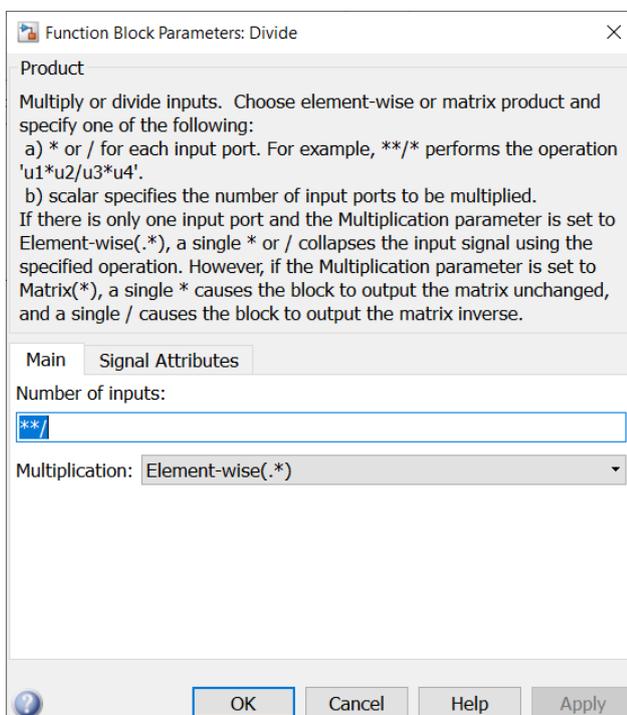
б.

Внешний вид (а) и параметры блоки (H). Входные параметры согласно древа модели блок 1.

Арифметические действия, такие как умножение или деление производятся блоками Product/Divide.



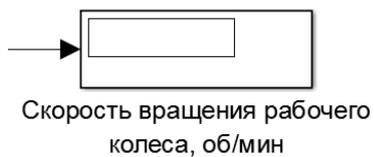
а.



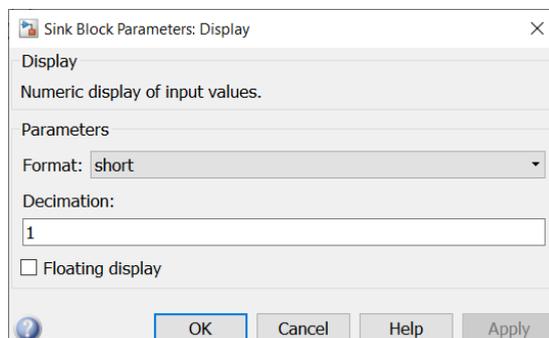
б.

Внешний вид (а) и параметры блока Product/Divide

За вывод результата расчета отвечает блок Display.



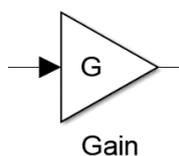
а.



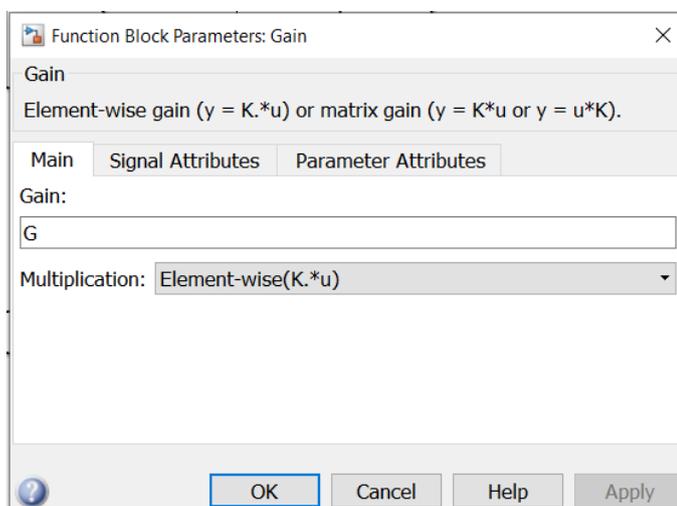
б.

Внешний вид блока Display(а) и параметры его блока (б)

Блок Gain умножает входной сигнал на заданную величину.



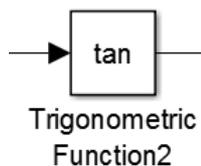
а.



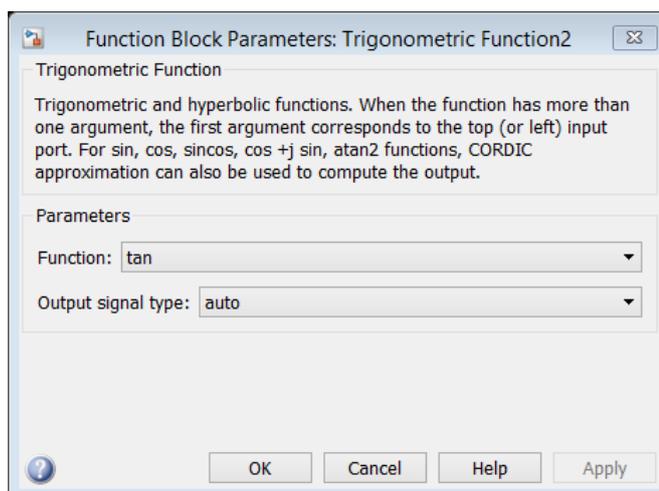
б.

Внешний вид (а) и параметры блока Gain(б)

Для возврата тригонометрической функции от входного сигнала используется блок Trigonometric Function.



а.



б.

Внешний вид(а) и параметры блока Trigonometric Function(б)

Для более удобного и компактного расположения элементов модели в Simulink используется блок Subsystem. При двойном нажатии разворачивается внутреннее содержимое блока, где производятся операции над входными сигналами, и как результат, на выход блока подаются сигналы выходные.



Расчеты на входе

Внешний вид блока Subsystem.

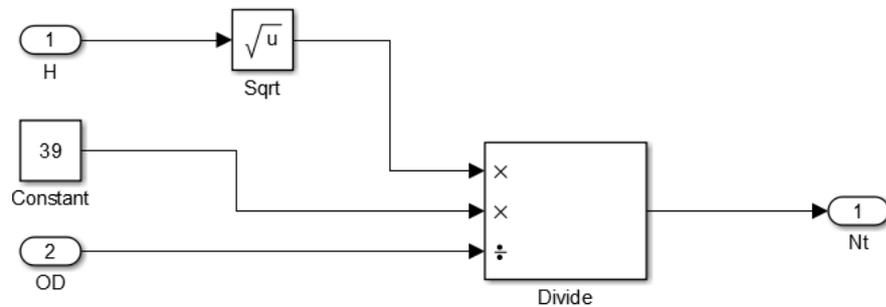
Для задания функции, не предусмотренной в библиотеке Simulink, используется блок MATLAB function. Он позволяет написать код необходимой функции от входного сигнала на языке программирования MATLAB.

Построенные подблоки кинематических параметров турбин: скорость вращения турбин (η_k); относительные скорости гидронапора на входе (V_1) её суммарная скорость (V_f1); соответственно и для скоростей на выходе приведены.

Расчетные зависимости этих параметров были нами изложены в параграфе 2.1.

Расчет скорости вращения рабочего колеса N_t определяем:

$$N_t = \frac{39\sqrt{H}}{OD}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$



Подблок расчета скорости вращения рабочего колеса

Относительная скорость воды на входе составит:

$$V_1 = \sqrt{2gH}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Суммарная скорость воды на входе:

$$V_t = V_\theta + V_1, \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Идеальная входная скорость в рабочем колесе:

$$U_1 = \frac{\pi \cdot OD \cdot N_t}{60}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Относительная скорость воды на входе:

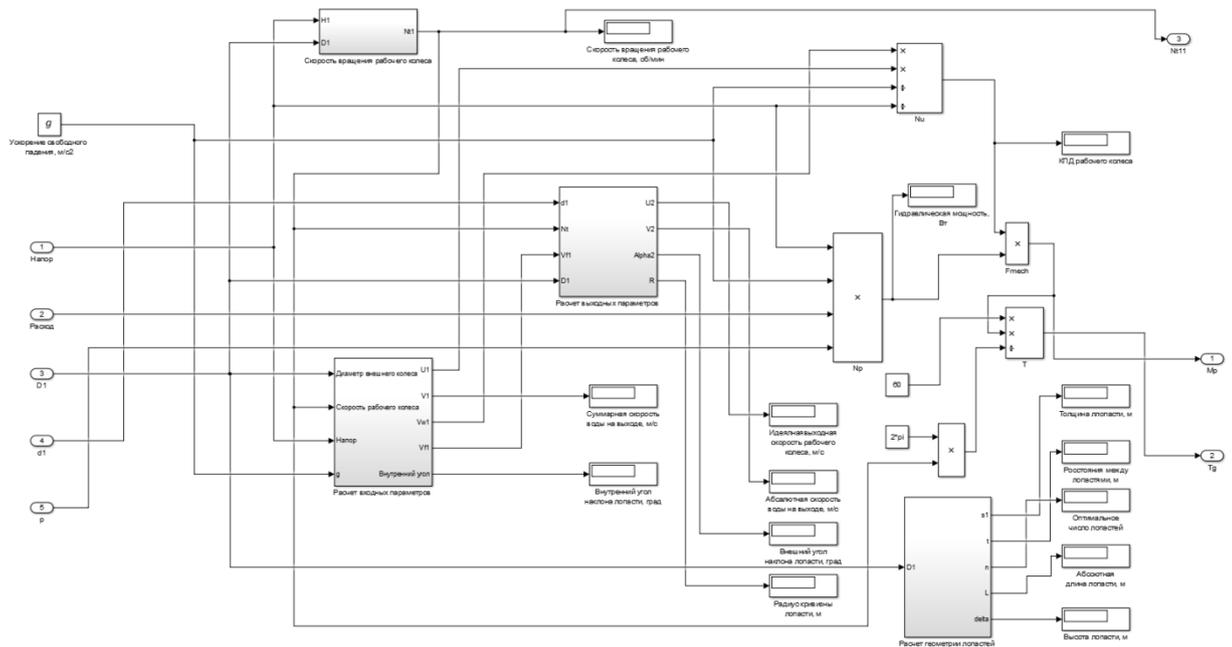
$$V_{w1} = V_t \cos \alpha_1, \frac{M}{c},$$

Переносная скорость воды:

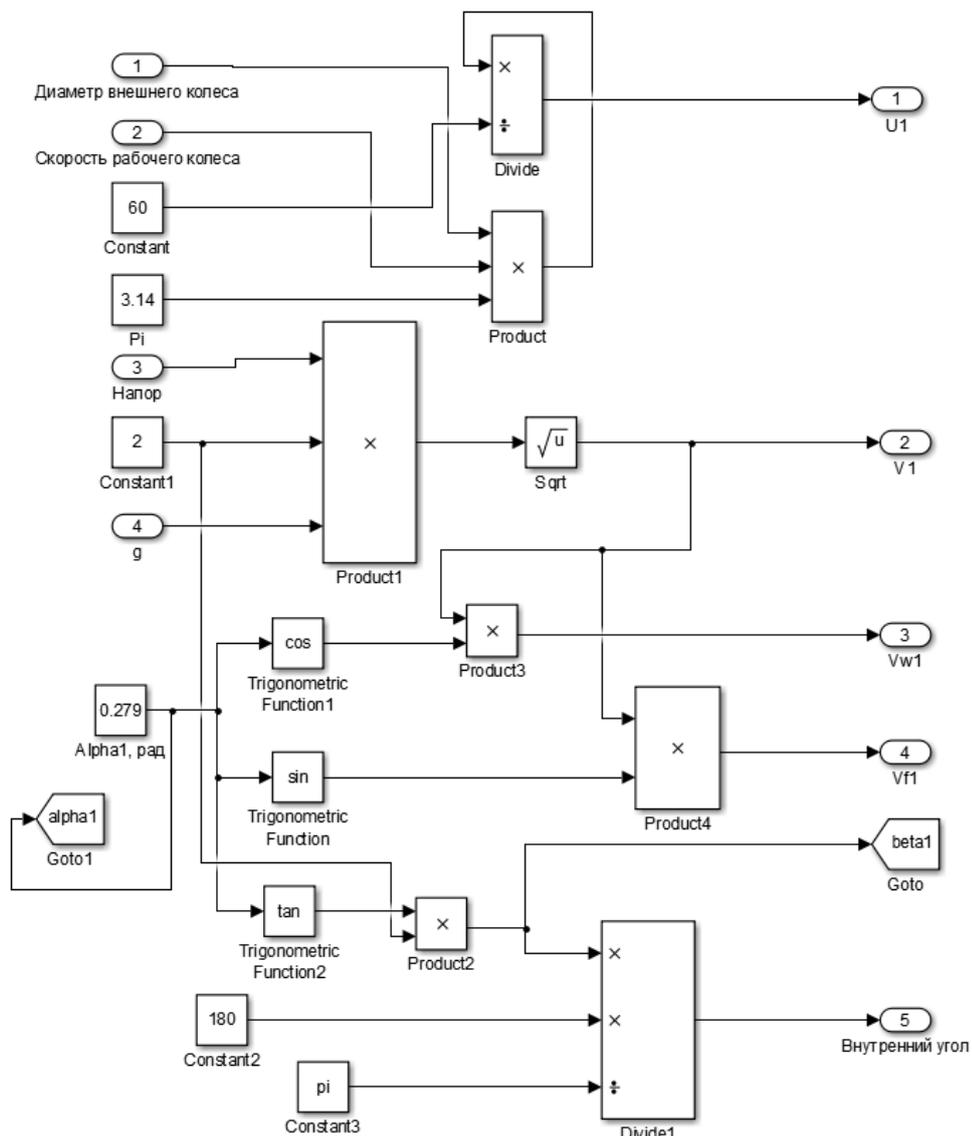
$$V_{f1} = V_t \sin \alpha_1, \frac{M}{c}$$

Внутренний угол наклона лопасти:

$$\beta_1 = \arctan \left(\frac{V_{f1}}{V_{w1} - U_1} \right)$$



Блок расчета по входным параметрам



Подблок расчета входных параметров

Соответствующие подблоки для расчета выходных параметров на основе полученных зависимостей (см. § 2.1) и расчета геометрии лопастей приведены ниже.

Идеальная выходная скорость в рабочем колесе:

$$U_2 = \frac{\pi \cdot ID \cdot N_t}{60}, \frac{м}{с}$$

Абсолютная скорость воды на выходе:

$$V_2 = V_{f1} = V_{f2}, \frac{м}{с}$$

Относительная скорость воды на выходе:

$$V_{w2} = V_t \cos \beta_2 = 0 \frac{M}{c}$$

Внешний угол наклона лопасти:

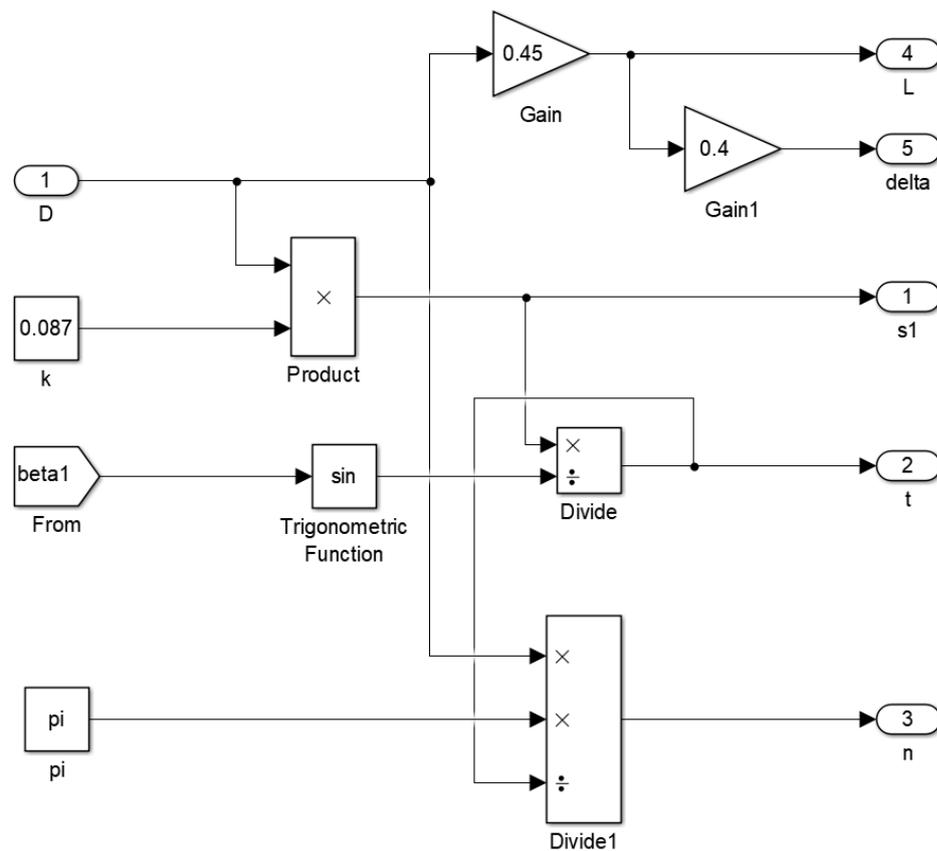
$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{V_{f2}}{U_2}\right)$$

Гидравлическая мощность:

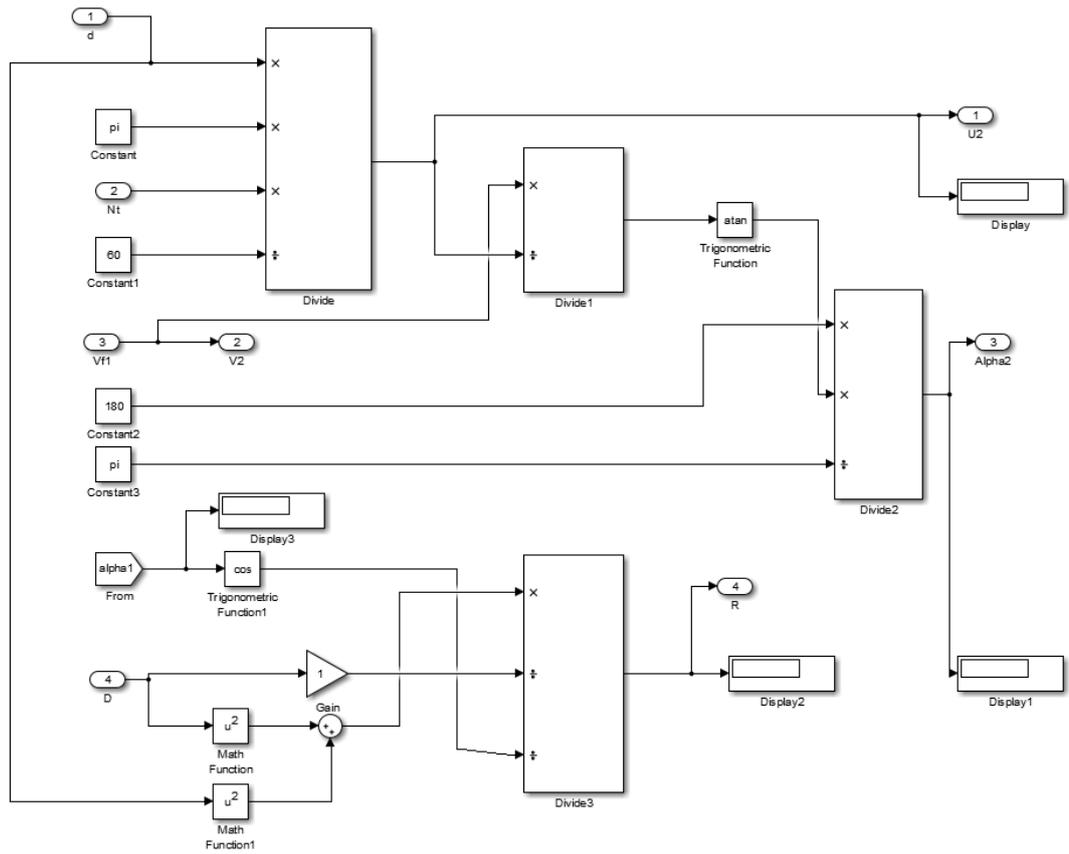
$$P_{hydr} = HQg\rho$$

Коэффициент полезного действия турбины импульсного типа:

$$\eta_t = \frac{V_{w1}U_1}{gH}$$



Подблок расчета геометрии лопастей рабочего колеса



Подблок расчета выходных параметров (относительно рабочего колеса)